

# POLARIMETRISCHE ANALYSE BREITBANDIGER RADAR-SIGNALE FÜR BILDGEBENDE ANWENDUNGEN

## DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Ilmenau

vorgelegt von  
M.Sc. Matthias Röding  
geboren am 31. 10. 1988 in Aschersleben

---

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Reiner S. Thomä  
Technische Universität Ilmenau  
Prof. Dr.-Ing. Dirk Heberling  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  
Prof. Dr.-Ing. Jörn Thielecke  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 10. 07. 2018

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 29. 08. 2019

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019000394



# Kurzfassung

Wie Systeme ihre Umwelt erfassen und Umgebungen wahrnehmen ist in den letzten Jahren in nahezu allen Lebensbereichen in den Fokus technischer Entwicklungen gerückt. Es sind Anwendungen der Assistenz oder Automatisierung im privaten Raum (*Smart Home*), in der Produktion (*Industrie 4.0*) oder in Mobilitätssystemen der Logistik bzw. des Verkehrs (*autonomes Fahren*), welche möglichst qualitativ hochwertige und von Umgebungseinflüssen unabhängige Sensorinformationen für ihre korrekte Funktionsweise benötigen.

Radar-Sensoren bieten die Möglichkeit von der Umgebung zurückgestreute Signale zu erfassen und durch räumlich verteilte Messungen eine Abbildung der Umwelt vorzunehmen. Unter Nutzung einer synthetischen Apertur und Radar-Signalen großer Bandbreite entstehen dabei Kartierungen, welche räumliche Informationen von Rückstreuobjekten bereitstellen. Die Auswertung des Polarisationszustands gesendeter und empfangener Signale, bietet außerdem eine detailliertere Aussage über deren Interaktion mit der Umgebung und ursächliche *Streumechanismen*. In der klassischen Radar-Fernerkundung sind die Aufgaben der Bildgebung und der Polarimetrie voneinander getrennte Verarbeitungsschritte, da erst nach der Bildgebung die notwendige Auflösung zur Trennung einzelner Mechanismen zur Verfügung steht. Informationen der Objekte wie Form oder Ausrichtung im Raum werden entsprechend durch Auswertung des polarimetrischen Streumechanismus im Bildbereich gewonnen.

Ziel dieser Arbeit ist die Erweiterung wissenschaftlicher Ausgangspunkte bildgebender UWB-Radar-Sensorik durch Methoden der Radar-Polarimetrie der Fernerkundung.

Durch die Erschließung polarimetrischer Signalanalyse breitbandiger Radar-Signale als Vorverarbeitung bildgebender Verfahren, können polarimetrische Mechanismen bereits im Zeitbereich identifiziert und ausgewertet werden. Die daraus gewonnenen Informationen dienen der Zerlegung der Radardaten in einzelne Rückstreu-komponenten, wodurch bildgebende Verfahren die Umgebung des Sensors mit höherer Genauigkeit und Interpretierbarkeit erfassen. Dazu werden zwei neuartige Methoden detailliert diskutiert und mit bestehenden polarimetrischen Verfahren in Bezug gesetzt. Es handelt sich dabei um einen modellbasierten Ansatz der Zerlegung im Zeitbereich und ein Verfahren der statistischen Analyse in Zeit- und Bildbereich. Die Funktionsweise der Methoden wird mit Simulationsdaten veranschaulicht und durch Messungen in realitätsnaher Umgebung verifiziert.



# Abstract

How systems capture their environment and perceive information of the surrounding area has become the focus of technological developments in almost all areas of life in recent years. These are applications of assistance or automation in the private sector (*Smart Home*), in production (*Industry 4.0*) or in mobility and logistics systems (*Autonomous Driving*), which require the highest possible level of sensor information independent of environmental influences for their correct functioning. Radar sensors provide the ability to detect signals scattered back from objects within the environment and to map an area through spatially distributed measurements. Using a synthetic aperture and radar signals of large bandwidth leads to maps that provide spatial location information of backscatter objects. The evaluation of the polarization state of transmitted and received signals also provides more detailed information about their interaction with the environment and causative *scattering mechanisms*. In classical radar remote sensing, the tasks of imaging and polarimetry are separate processing steps, since the necessary resolution for the separation of individual mechanisms is available only after imaging. Information of objects such as shape or orientation in space are obtained accordingly by evaluation of the polarimetric scattering mechanism in the image domain.

The aim of this work is the extension of scientific methods of UWB radar signal processing by radar polarimetry remote sensing techniques.

By utilizing polarimetric signal analysis of broadband radar signals as pre-processing of imaging techniques, polarimetric mechanisms can be identified and evaluated in the time domain. The information obtained is used to decompose the radar data into individual backscatter components, allowing imaging techniques to capture the sensor's environment with increased accuracy and interpretability. For that purpose two novel methods and their relation to existing polarimetric techniques are discussed in detail. A model-based approach to decompose time domain radar data and a statistical analysis method in time and image domain are described in this work using simulation data and verifications by measurements in close-to-reality surroundings.



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit begründet sich auf der zurückliegenden Tätigkeit als Stipendiat und wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Elektronische Messtechnik und Signalverarbeitung, die ich aufgrund des gesamten Umfelds aus Kollegen und Mitstreitern als großartige Bereicherung meiner Zeit in Ilmenau begreife. Daher gilt jedem der sich zu diesem Personenkreis zählt mein voller Dank.

Besonders möchte ich meinem Doktorvater Prof. Reiner Thomä für die stete Unterstützung und die mir eingeräumten Freiheiten bei der Ausrichtung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit danken. Ebenso gilt mein besonderer Dank Prof. Dirk Heberling und Prof. Jörn Thielecke, die sich als Gutachter zur Verfügung gestellt haben. Für das aufmerksame Lesen meiner Dissertation, zahlreiche konstruktive Gespräche und gemeinsame Forschungsaktivitäten während der letzten Jahre, möchte ich mich zudem bei Dr. Thomas Dallmann und Dr. Rudolf Zetik bedanken.

Die zurückliegende Zeit im Fachgebiet war geprägt von einer angenehmen Arbeitssphäre, herausfordernden Problemstellungen und vielen Momenten die in Erinnerung bleiben werden. Dankend hervorhebend möchte ich an dieser Stelle Dr. Jürgen Sachs und Thomas Just für den unvergesslichen Ausflug in die Archäologie und die gemeinsamen Abende auf dem Ölberg. Weiterhin danke ich Diego Andres Dupleich, Gerd Sommerkorn, Stephan Häfner und Robert Müller für die gemeinsamen Anstrengungen und die wertvolle Zusammenarbeit.

Zudem möchte ich mich bei Frau Gitta Weber-Wolf für ihren unermüdlichen Kampf gegen das von Mitarbeitern und Bürokratie verursachte Chaos bedanken, der das Uhrwerk der Elektronischen Messtechnik beständig am Laufen gehalten hat.

Finanzielle Förderung und Unterstützung durch Dritte ist Grundvoraussetzung für Forschung und Wissenschaft. Daher möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Thüringer Landesgraduiertenförderung danken.

Nicht zuletzt möchte ich an dieser Stelle meinen Eltern Karin und Eberhard (+) Röding, meiner Familie und Freunden sowie meiner Freundin Kristina Naskovska für ihre Unterstützung auf dem langen Weg bis heute danken.

Matthias Röding





# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen der Radar-Polarimetrie</b>	<b>5</b>
2.1. Ausbreitung elektromagnetischer Wellen . . . . .	7
2.1.1. Wellengleichung im Vakuum . . . . .	7
2.1.2. Polarisationsellipse . . . . .	8
2.1.3. Jones-Vektor . . . . .	10
2.1.4. Wechsel der Polarisationsbasis . . . . .	10
2.2. Streuung elektromagnetischer Wellen . . . . .	11
2.2.1. Rückstreugeometrie . . . . .	12
2.2.2. Polarimetrische Streumatrix . . . . .	13
2.2.3. Streuvorgänge an kanonischen Objekten . . . . .	14
2.2.4. Allgemeines Rückstreumodell . . . . .	17
2.3. Polarimetrische Signalverarbeitung . . . . .	22
2.3.1. Darstellungsformen polarimetrischer Daten . . . . .	22
2.3.2. Polarimetrische Zerlegungsverfahren . . . . .	24
2.3.3. Zusammenfassung . . . . .	31
<b>3. Breitbandige Radar-Bildgebung im Nahbereich</b>	<b>35</b>
3.1. Bildgebende Systeme mit synthetischer Apertur . . . . .	37
3.1.1. Raum- und luftgestützte Radar-Fernerkundung . . . . .	37
3.1.2. Seismische Signalverarbeitung . . . . .	40
3.1.3. UWB-Radar-Sensorik . . . . .	42
3.2. Bildgebungsalgorithmen der UWB-Radar-Sensorik . . . . .	44
3.2.1. Einfache kohärente Integration . . . . .	46
3.2.2. Kohärente Integration nach Kirchhoff . . . . .	47
3.2.3. Modellbasierte Migration . . . . .	48
3.2.4. Weitere Abbildungsverfahren . . . . .	49
3.3. Polarimetrie in der Nahbereichserkundung . . . . .	50
3.3.1. Objekterkennung und RCS-Bildgebung . . . . .	51
3.3.2. Lokalisierung, Kartierung und Rekonstruktion einer Umge- bung . . . . .	52
3.3.3. Zusammenfassung . . . . .	54

<b>4. UWB-Polarimetrie zur Radar-Bildgebung im Nahbereich</b>	<b>55</b>
4.1. Auswertung von Bildgebungsresultaten . . . . .	56
4.1.1. Angewandte Methodik . . . . .	56
4.1.2. Interpretierbarkeit von Bildgebungsresultaten . . . . .	57
4.2. Zeitbereichszerlegung polarimetrische Radar-Daten . . . . .	63
4.2.1. Konzept der polarimetrischen Filterung . . . . .	63
4.2.2. Überblick des Verfahrens . . . . .	64
4.2.3. Projektion des Datenraums . . . . .	65
4.2.4. Integration in bildgebende Signalverarbeitung . . . . .	68
4.2.5. Resultate und Diskussion . . . . .	69
4.3. Iterative Verbundzerlegung von Zeit- und Bildbereichsdaten . . . . .	74
4.3.1. Überblick des Verfahrens . . . . .	75
4.3.2. Lokalisierung des Streumechanismus . . . . .	76
4.3.3. Datenselektion im Zeitbereich . . . . .	77
4.3.4. Modellierung des Merkmalsraums und Clustering . . . . .	77
4.3.5. Abbruchbedingung und Zerlegungsergebnis . . . . .	80
4.3.6. Integration in bildgebende Signalverarbeitung . . . . .	81
4.3.7. Resultate und Diskussion . . . . .	83
<b>5. Messungen und Bewertung der Verfahren</b>	<b>89</b>
5.1. Messumgebung . . . . .	89
5.1.1. Szenario und Zielstellung . . . . .	89
5.1.2. Radar-Messtechnik . . . . .	91
5.2. Messdatenverarbeitung . . . . .	92
5.2.1. Vorverarbeitung . . . . .	92
5.2.2. Konventionelle Bildgebung . . . . .	94
5.2.3. Bildgebung nach Zerlegung im Zeitbereich . . . . .	97
5.2.4. Bildgebung nach iterativer Verbundzerlegung . . . . .	101
5.3. Charakterisierung der Rückstreuobjekte . . . . .	106
5.3.1. Kohärente Zerlegung der Cluster . . . . .	106
5.3.2. Inkohärente Zerlegung der Cluster . . . . .	108
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>111</b>
<b>A. Anhang - Grundlegende Definitionen</b>	<b>119</b>
<b>B. Anhang - Ergänzende Abbildungen</b>	<b>127</b>
<b>Akronyme</b>	<b>141</b>
<b>Symbole</b>	<b>143</b>

Abbildungsverzeichnis	149
Tabellenverzeichnis	157
Literaturverzeichnis	159



# 1. Einleitung

## Bildgebende und polarimetrische Radar-Verfahren der Fernerkundung und im Nahbereich

Die historische Entwicklung der Radar-Polarimetrie ist eng verbunden mit der Entwicklung der Radar-Technik in der ersten Hälfte des 20. Jhd. und dem Entstehen der satellitengestützten Radar-Fernerkundung am Ende der 1970er Jahre. Grundlegende Vorarbeiten in Bezug auf den Polarisationszustand elektromagnetischer Wellen und die Beschreibung von Polarisationsänderungen bei der Interaktion mit Objekten entstanden bereits vorher im Bereich der Optik. Während der Entstehung der Radar-Polarimetrie wurden diese Konzepte angepasst und weiterentwickelt.

Polarimetrie beschäftigt sich mit der Identifikation und Auswertung ursächlicher Mechanismen, welche zu einer Veränderung des Polarisationszustands elektromagnetischer Wellen bei Interaktion mit der Umwelt führen können. Damit benötigen die Verfahren zunächst eine möglichst genaue Aussage über die elektromagnetischen Verhältnisse eines isolierten Ereignisses wie der Rückstreuung eines Objekts. Diese Voraussetzung kann durch die räumliche Lokalisierung eines Ereignisses durch bildgebende Verfahren der Radar-Sensorik geschaffen werden, wodurch die fachliche Nähe der Polarimetrie zur Radar-Fernerkundung gegeben ist.

Im Laufe der Zeit entstanden zahlreiche auf bestimmte Anwendungen optimierte Verfahren, wobei die Extraktion zusätzlicher Informationen aus Radar-Bildern im Zentrum stand. Im Sinn der Signalverarbeitung kennzeichnet sich die klassische Polarimetrie als eine der Bildgebung nachgestellte Verarbeitungsstufe aus. Aufgrund schmalbandiger Sendesignale und der besonderen Beleuchtungsgeometrie ist dieses Vorgehen notwendig, da Rückstreuungsvorgänge erst im fokussierten Bildbereich sinnvoll voneinander unterschieden werden können. Polarimetrische Zerlegungs- und Klassifikationsmethoden dienen anschließend dem Zweck verschiedene Streuvorgänge innerhalb eines Bildbereich zu unterscheiden und physikalische Eigenschaften der beleuchteten Objekte zu extrahieren.

Modulierte Dauerstrich-Radar-Systeme (FMCW) mit geringer relativer Bandbreite dominieren die Radar-Bildgebung der Fernerkundung, wobei der Sensor auf einer sehr genau bekannten Flugbahn ein Gebiet in großer Distanz seitlich der Bewegungsrichtung beleuchtet und die synthetische Apertur des Systems zur Bildgebung genutzt wird. In der Nahbereichssensorik zeichnen sich Einsatzszenarien

---

und Anwendungsgebiete für Radar-Systeme durch eine große Vielfalt von unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Sensortechnologien aus. Abbildung 1.1 veranschaulicht dabei die beiden sich gegenüberstehenden Szenarien, wobei in dieser Arbeit der Nahbereich im Zentrum der Untersuchungen steht.



**Abbildung 1.1.:** Szenarien bildgebender Radar-Fern- und -Nahbereichserkundung: Die Transformation der Radar-Daten in den Bildbereich (orange) dient der Abbildung der beleuchteten Umgebung und der Lokalisierung von Rückstreueobjekten. Aufgrund unterschiedlicher geometrischer und systembezogener Parameter bestehen jedoch große Unterschiede in der Zusammensetzung der Radar-Daten und der enthaltenen Informationen.

Abweichend zu den Rahmenbedingungen der Fernerkundung, bestehen in Anwendungen breitbandiger UWB-Radar-Sensorik (engl.:ultra wideband) im Nahbereich deutliche Unterschiede in der Beleuchtungsgeometrie und der Bewegung des Sensors. Daraus entstehende Konsequenzen für die statistischen Eigenschaften und Komponenten der Empfangssignale wurden im Bereich der Radar-Bildgebung in vorangegangenen Forschungsbestrebungen detailliert behandelt und algorithmisch umgesetzt. Damit ermöglichen UWB-Systeme eine räumlich genaue Kartierung der Umgebung und die Lokalisierung von Umgebungsbestandteilen. Verfahren der Radar-Polarimetrie wurden bisher analog zur Herangehensweise der Fernerkundung als nachgestellter Verarbeitungsschritt ausgeführt, um physikalische Eigenschaften der lokalisierten Objekte abzuleiten. Zentraler Ausgangspunkt für ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes Projekt war daher die direkte Integration polarimetrischer Signalinformationen in Bildgebungsverfahren, wie sie in der UWB-Radar-Sensorik bereits Verwendung finden [1]. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens mit einem Förderzeitraum von 3 Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, welche die Grundlage dieser Arbeit darstellen und die Zielstellung der weiteren Ausführungen definieren.

---

## Zielstellung und inhaltliche Gliederung

Durch die Verwendung breitbandiger Sendesignale stehen bereits im Zeitbereich Radar-Daten mit einer hohen Auflösung in Ausbreitungsrichtung zur Verfügung. Diese Eigenschaft ermöglicht eine schnelle und intuitive Bewertung und Verarbeitung der Messdaten, da zahlreiche Informationen direkt im Zeitbereich gewonnen werden können. Die folgenden Untersuchungen haben dabei eine polarimetrische Auswertung der Radar-Daten zum Ziel, um nützliche Informationen für eine nachfolgende Bildgebung abzuleiten. Insgesamt soll dabei die Interpretierbarkeit der Resultate im Vergleich zu konventionellen Methoden verbessert werden, da bestimmte verfälschende Einflüsse wie Bildartefakte, Mehrdeutigkeiten oder Störungen von Bildbereichen verringert werden. Dazu dienen Verfahren der von der Fernerkundung geprägten Radar-Polarimetrie und der bildgebenden UWB-Radar-Sensorik als Grundlage zur Entwicklung neuartiger Methoden, um die Vorteile beider Fachrichtungen zu vereinen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst die elementaren elektromagnetischen Bedingungen der klassischen Radar-Polarimetrie in Kapitel 2 ausgeführt, wobei die Modellierung des komplexen Problems der Streuung elektromagnetischer Wellen mithilfe des Konzepts eines Streumechanismus thematisiert wird. Darauf aufbauend werden die typischen Verfahrensschritte polarimetrischer Signalverarbeitung abgeleitet und anhand einiger Zerlegungsverfahren die Zielstellung der Extraktion physikalischer Eigenschaften eines rückstreuenden Objekts ausgeführt.

Die polarimetrischen Informationen werden bis zu diesem Abschnitt der Arbeit als abstrakte Streumatrix behandelt, welche konventionell aus den Resultaten bildgebender Verfahren entnommen wird. Kapitel 3 widmet sich daher der Transformation der Radar-Daten in den Bildbereich, wobei nach einer Einordnung der verschiedenen Szenarien aus Fernerkundung und Nahbereichssensorik die algorithmische Umsetzung von Abbildungsverfahren im Zentrum der Ausführungen steht. Zum Abschluss des maßgeblichen Stands der Forschung als Grundlage dieser Arbeit, wird zudem die Ausnutzung polarimetrischer Information in Anwendungen des Nahbereichs diskutiert.

Das wesentliche Ziel der Arbeit und des zugrundeliegenden Forschungsvorhabens ist die Untersuchung von Möglichkeiten der Nutzung polarimetrischer Auswertungsverfahren zum Zweck bildgebender Algorithmen. Ausgehend von den vorangegangenen grundlegenden Gedanken werden in Kapitel 4 zwei Konzepte vorgestellt, welche eine polarimetrische Signalanalyse in den Bildgebungsvorgang einbinden, um die Interpretierbarkeit der Resultate zu erhöhen. Dabei werden Parallelen zu bestehenden Verfahren gezogen und ein Zusammenhang zur klassischen Radar-Polarimetrie hergestellt.

Auf Grundlage von Simulationsdaten werden zunächst die Funktionsprinzipien der entwickelten Verfahren veranschaulicht, wodurch bestimmte Effekte isoliert

---

betrachtet werden können. In Kapitel 5 findet daher eine Verifizierung der Methoden anhand realer Messdaten statt indem nach kurzer Vorstellung der Messumgebung ein Vergleich konventioneller und neuartiger Verarbeitung angestellt wird. Weiterhin wird anhand der gewonnen Messdaten eine Extraktion physikalischer Objekteigenschaften wie Form oder Ausrichtung im Raum zur Steigerung der Interpretierbarkeit durchgeführt.



## 2. Grundlagen der Radar-Polarimetrie

### Historische Einordnung

Basierend auf der Forschung im Bereich der Optik etablierten sich durch die Arbeiten zahlreichen Wissenschaftler im 19. Jhd., darunter *Fresnel* und *Stokes*, ein Vielzahl von Methoden zur Beschreibung und Messung der Polarisation als charakteristisches Merkmal elektromagnetischer Wellen [2]. In der Optik als *Ellipsometrie* bezeichnet, beschäftigt sich dieser Fachbereich mit der Auswertung des Polarisationszustands von Licht und dessen Änderung bei der Ausbreitung durch ein Medium bzw. der Interaktion an Grenzschichten. Der Stokes-Vektor stellt dabei, sowohl für vollständig, partiell oder unpolarisiertes Licht ohne erkennbare Vorzugspolarisation, ein Modell auf Grundlage von Intensitätsmessungen zur Verfügung. In den 40er Jahren des 20. Jhd. fanden im Bereich der Analyse optischer Systeme und der mathematischen Beschreibung der Ausbreitung von Lichtstrahlen zahlreiche Untersuchungen statt, welche zu zwei grundlegenden Formalismen nach *Müller* und *Jones* führten [3, 4]. Diese setzen Polarisationszustände eingehender und ausgehender elektromagnetischer Wellen in einem optischen System in einen linearen mathematischen Zusammenhang mit einer Systemgröße. Der Müller-Formalismus thematisiert anhand von Leistungsgrößen die Polarisationsverhältnisse durch inkohärente Betrachtungen mittels Stokes-Vektoren, wohingegen der Jones-Formalismus lediglich vollständig polarisierte Wellen unter Definition einer Phase behandelt. Damit ermöglicht die Forschung von Jones eine einfachere Beschreibung kohärenter Wellenbeiträge und damit die Untersuchung von Interferenz und Beugungseffekten, welche durch inkohärente Betrachtung nur umständlich erschlossen werden können [5, 6].

Parallel dazu wurde die bereits 40 Jahre zuvor patentierte Radar-Technologie weiterentwickelt, wobei insbesondere Neuerungen dual polarisierter Antennen zur Übertragung aus der Optik bekannter Methoden auf Funkanwendungen typischer niedriger Frequenzbereiche führten. Ab dem Ende der 1940er Jahre besteht die *Polarimetrie* in der Radar-Technik neben der Ellipsometrie in der Optik, besonders durch die Arbeiten von *Sinclair* und *Kennaugh* an der Ohio State University, als eigenständige Fachrichtung [7–10]. Im Unterschied zur Optik definierte

---

man die zugrundeliegenden Koordinatensysteme in der Polarimetrie häufig wie in Unterabschnitt 2.2.1 beschrieben im Sinn der Rückwärts-Streuung eines beleuchteten Objekts zur Sende-Empfangsstation, wobei die Ausbreitungsrichtung auf Hin- und Rückweg des Sendesignals immer zum Objekt zeigt und nicht in Richtung des physikalischen Energietransports. Kennaugh forschte unter anderem an der Bestimmung der optimalen Polarisierung der Antennen für die Detektion eines Flugobjekts und beschrieb charakteristische Polarisationszustände der Sinclair-Matrix (auch Streumatrix), welche die Informationen des Objekts beinhaltet.

Huynen erkannte in den Ergebnissen Kennaughs, dass es verschiedene Mechanismen geben muss, welche eine Modellierung des umfassenden elektromagnetischen Problems der Rückstreuung ermöglichen und mit physikalischen Eigenschaften der vollständigen Umgebung (Objekt und Clutter) korrespondieren. In seinem umfassenden Konzept der Zielerückstreuung untersucht er die physikalische Signifikanz der Elemente der Kennaugh-Matrix, welche teilweise von der Rotation des Ziels um die direkte Sichtverbindung (engl.: line of sight) abhängig sind. Durch die Rückführung der Streumatrix und der Rotationsbedingungen des Ziels auf ein Eigenwertproblem, ergaben sich letztendlich 6 Parameter, welche von charakteristischen Objekteigenschaften ableitbar sind und lediglich Abhängigkeiten zu Frequenz und Aspektwinkel zum Ziel aufweisen [11]. Dieses Vorgehen der Verbindung von Analyse und Synthese einer Streumatrix mittels Generatortermen bzw. orthogonaler Komponenten und die Interpretation physikalischer Eigenschaften, begründete als Pionierarbeit eine Vielzahl folgender polarimetrische Zerlegungsverfahren. In seiner Dissertation veröffentlichte Huynen zahlreiche anspruchsvolle Ansätze, welche die Extraktion von Information über die beleuchtete Umgebung thematisieren [12], wobei bereits Ansätze deterministischer und stochastischer Modellierung unterschiedlicher Prozesse aufgegriffen wurden. Aufgrund der Komplexität der zugrundeliegenden mathematischen und physikalischen Konzepte wurden in den folgenden Jahren zahlreiche Fragen in Bezug auf Deutung und Bestimmung einzelner Parameter diskutiert. Insbesondere die Arbeiten von *Boerner et al.* bieten eine detaillierte Aufarbeitung der Konzepte von Kennaugh und Huynen [13–21].

Der aktuelle Stand der Technik beinhaltet eine Vielzahl unterschiedlicher Zerlegungsmethoden der polarimetrischen Streumatrix bzw. abgeleiteter Formen, wobei häufig bestimmte Anwendungen mit spezifischen Rückstreumodellen als Grundlage dienen. Da die Mehrheit der entwickelten Verfahren auf der Lösung von Eigenwertproblemen bzw. gruppentheoretischen Überlegungen der Kombination orthogonaler Basiskomponenten beruhen, bieten Zerlegungsverfahren eine Zuordnung beobachteter Rückstreuung zu bestimmten kanonischen Vorgängen. Durch die hohe Anzahl von Einsatzszenarien der Polarimetrie insb. im Bereich der Erdbeobachtung konzentrieren sich weite Teile des Themengebiets mit der Auswertung von Satellitenbildern im Bezug auf der Extraktion von Merkmalen wie Bebauungszustand, Biomasse, Landnutzung u.v.m. In Textbuchform wurde eine detaillierte und

umfangreiche Aufarbeitung der physikalischen Grundlagen und der Modellierung polarimetrischer Rückstreuung in [22, 23] präsentiert, wohingegen sich [24–26] mit der typischen Signalverarbeitung polarimetrischer Radar-Daten befassen.

Im Folgenden werden nach einer kurzen Thematisierung der elektromagnetischen Grundlagen zur Definition eines Polarisationszustands besonders die Modellierungsaspekte der Streuung elektromagnetischer Wellen anhand von Streumechanismen behandelt. Neben der Synthese eines Streumechanismus anhand kanonischer Formen der Huynen-Euler-Parameter, erfolgt abschließend eine Übersicht typischer Darstellungsformen polarimetrischer Daten und Zerlegungsverfahren der Signalverarbeitung.

## 2.1. Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

### 2.1.1. Wellengleichung im Vakuum

Mithilfe der Maxwellschen Gleichungen (A.15) lassen sich die grundlegenden Zusammenhänge der Feld- und Materialgrößen bei der Interaktion oder Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in einem Medium beschreiben. Zieht man frequenzabhängige Materialeigenschaften in Betracht, ergeben sich Verschiebungsstrom  $\mathbf{J}$ , elektrische Flussdichte  $\mathbf{D}$  und magnetische Flussdichte  $\mathbf{B}$  (A.14) durch entsprechende Faltungsoperationen mit den Impulsantworten der Materialeigenschaften. Sollten zudem richtungsabhängige Materialeigenschaften vorhanden sein, können die Materialkennwerte den Differentialoperatoren nicht vorangestellt werden. Dieser Fall soll in dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet werden. Wie in den meisten Lehrbüchern üblich findet eine Umformung der Maxwellschen Gleichungen hin zu einer Wellengleichung (2.1) nach Fouriertransformation der zugrundeliegenden Größen in den Frequenzbereich statt.

$$\frac{1}{\epsilon} \text{grad}(\rho) - \Delta \mathbf{E} = \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{E} - j\omega \sigma \mu \mathbf{E} \quad (2.1)$$

Zur Definition grundlegender Eigenschaften elektromagnetischer Wellen, lässt sich die Annahme eines Mediums treffen, welches sich in einem verlustlosen Zustand frei von Strömen und Ladungsträgern befindet. Nach der Rücktransformation von (2.1) in den Zeitbereich ergibt damit ein zeitlich und räumlich veränderliches elektrisches Feld  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  als Lösung der vereinfachten Wellengleichung gemäß Gleichung 2.2.

$$\Delta \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) - \mu * \epsilon * \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (2.2)$$

Als einfachste Lösung der partiellen Differentialgleichung lässt sich das elektrische Feld einer ebenen, harmonischen elektromagnetischen Welle in kartesischen Koordinaten gemäß Gleichung 2.3 beschreiben. Der Wellenvektor  $\mathbf{k} = k \mathbf{e}_k$  definiert

dabei die Ausbreitungsrichtung einer monochromatischen Welle der Kreisfrequenz  $\omega$ . Im Vakuum ergibt sich die Wellenzahl  $k_0$  aus dem Betrag von  $\mathbf{k}$  als  $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ .

$$\mathbf{E}(\mathbf{k}, \mathbf{r}, t) = \Re \left\{ \mathbf{E}_0 e^{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi_E)} \right\} \quad (2.3)$$

Dieses deutlich vereinfachte Wellenmodell kann zur Definition einiger grundlegenden Eigenschaften im Bezug auf Form und Verhalten einer Welle bei der Interaktion mit Objekten herangezogen werden. Es unterliegt jedoch zahlreichen Annahmen, welche bei der Übertragung auf reale Messdaten beachtet werden müssen und Einfluss auf Messabläufe und verarbeitende Signalverarbeitung nehmen.

### 2.1.2. Polarisationsellipse

Folgt man dem Modell in (2.3) findet der Energietransport der Welle in Ausbreitungsrichtung  $\mathbf{e}_k$  statt, welche zusammen mit den zueinander orthogonalen Einheitsvektoren  $\mathbf{e}_\Phi$  und  $\mathbf{e}_\Theta$  ein dreidimensionales Koordinatensystem bildet. Entsprechend besteht der Vektor der TEM-Welle in ausreichend großer Distanz zur emittierenden Antenne aus zwei zeitlich und räumlich veränderlichen Komponenten  $E_\Phi$  und  $E_\Theta$ .

$$\mathbf{E}(\mathbf{k}, \mathbf{r}, t) = \begin{bmatrix} E_\Phi \\ E_\Theta \\ E_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0\Phi} \cos(\omega t - kr + \varphi_\Phi) \\ E_{0\Theta} \cos(\omega t - kr + \varphi_\Theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Betrachtet man den Feldvektor (2.4) an Position  $\mathbf{r} = 0$ , bildet sich die Richtung des Feldes mit fortschreitender Zeit  $t$  als projizierte Ellipse gemäß Gleichung 2.5 in die  $\mathbf{e}_\Phi$ - $\mathbf{e}_\Theta$ -Ebene (Ausbreitungsebene) ab.

$$\left[ \frac{E_\Phi}{E_{0\Phi}} \right]^2 - 2 \frac{E_\Phi E_\Theta}{E_{0\Phi} E_{0\Theta}} \cos(\Delta\varphi) + \left[ \frac{E_\Theta}{E_{0\Theta}} \right]^2 = \sin^2(\Delta\varphi) \quad (2.5)$$

Der Unterschied der Phasen  $\Delta\varphi = \varphi_\Theta - \varphi_\Phi$  definiert dabei die Öffnung der Ellipse, wobei üblicherweise drei Polarisationsstypen unterschieden werden:

- $\Delta\varphi = 0$ , lineare Polarisation: Die Richtung der Oszillation des Feldvektors projiziert sich auf eine Linie. Je nach Orientierung und Wahl des zugrundeliegenden Koordinatensystems kann eine solche Polarisation auch als  $\Phi$ -Polarisation oder horizontale Polarisation bezeichnet werden, wenn sie parallel zum dazugehörigen Einheitsvektor verläuft.
- $\Delta\varphi = [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ , zirkulare Polarisation: Die Spitze des Feldvektor rotiert in oder entgegen des Uhrzeigesinn (UZS) auf einer Helix in Ausbreitungsrichtung, wodurch sich in projizierter Form ein Kreis in der Ausbreitungsebene abbildet.

- sonst, elliptische Polarisation: Besteht ein beliebiger Phasenunterschied zwischen den beiden orthogonalen Feldkomponenten, projiziert sich die Richtung der Oszillation als Ellipse in die Ausbreitungsebene.

Abbildung 2.1 zeigt die Veranschaulichung einer Polarisationsellipse mit den Beschreibungsgrößen der Amplitude  $A$ , Orientierung  $\alpha$  und Elliptizität  $\beta$  gemäß Gleichung 2.6-(2.8).  $A$  ergibt sich dabei direkt als Hypotenuse des rechtwinkligen inneren Dreiecks aus Haupt- und Nebenachse der Ellipse.

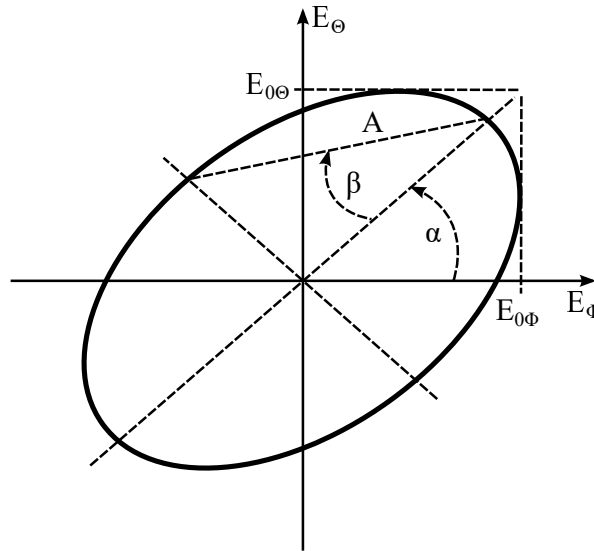
$$A = \sqrt{E_{0\Phi}^2 + E_{0\Theta}^2} \quad (2.6)$$

Zur Beschreibung der Orientierung des Polarisationszustands wird der Winkel zwischen Hauptachse und Einheitsvektors  $\mathbf{e}_\Phi$  verwendet.

$$\tan(2\alpha) = 2 \frac{E_{0\Phi} E_{0\Theta}}{E_{0\Phi}^2 - E_{0\Theta}^2} \cos(\Delta\varphi) \quad \text{mit } \alpha \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \quad (2.7)$$

Zur Unterscheidung der Polarisationsstypen dient die Definition der Ellipsenöffnung. Das Vorzeichen von  $\beta$  definiert dabei die Rotation des elektrischen Feldes für zirkulare oder elliptische Polarisation im UZS (-) oder entgegen dem UZS (+).

$$\sin(2\beta) = 2 \frac{E_{0\Phi} E_{0\Theta}}{E_{0\Phi}^2 + E_{0\Theta}^2} \sin(\Delta\varphi) \quad \text{mit } \beta \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right] \quad (2.8)$$



**Abbildung 2.1.:** Polarisationsellipse zur Veranschaulichung des Polarisationszustands des elektrischen Felds:  $A$  - Amplitude,  $\alpha$  - Orientierung,  $\beta$  - Elliptizität

### 2.1.3. Jones-Vektor

Zur Beschreibung der Eigenschaften vollständig polarisiertem Lichts, welches sich durch ein optisches System ausbreitet, führte Robert Clark Jones 1941 einen Formalismus ein, welcher die Polarisation einer elektromagnetischen Welle als komplexen Vektor in der Ausbreitungsebene beschreibt, wobei eine kohärente Zustandsbeschreibung im Vordergrund steht. Durch Umformung von (2.3) zu einer faktoriisierten Schreibweise und Einführung des Jones-Vektors  $\mathbf{E}_J$  ergibt sich das elektrische Feld (2.9) in kartesischer  $\mathbf{e}_\Phi$ - $\mathbf{e}_\Theta$ -Basis.

$$\mathbf{E}(\mathbf{k}, \mathbf{r}, t) = \Re \left\{ \mathbf{E}_J e^{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \right\} \quad \text{mit} \quad \mathbf{E}_J = \begin{bmatrix} E_{0\Phi} e^{j\varphi_\Phi} \\ E_{0\Theta} e^{j\varphi_\Theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{J\Phi} \\ E_{J\Theta} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Unter Nutzung der Parameter der Polarisationsellipse lässt sich ein Jones-Vektor gemäß Gleichung 2.10 bilden, welcher mit einer möglichst kleinen Anzahl an Parametern eine vollständige Beschreibung eines Polarisationszustands ermöglicht.

$$\mathbf{E}_J = A e^{j\varphi} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta) \\ j \sin(\beta) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Ellipsenamplitude  $A$  und absolute Phase  $\varphi$  nehmen gleichen Einfluss auf alle Komponenten des Jones-Vektors und können entsprechend vorgezogen werden. Im Sinn einer Matrixrotation wird die Orientierung der Polarisationsellipse durch die Rotationsmatrix im ersten Term definiert. Zur Beschreibung der Öffnung der Ellipse dient der Zeilenvektor des zweiten Terms. Einige typische Jones-Vektoren mit dazugehörigen Ellipsenparametern sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

### 2.1.4. Wechsel der Polarisationsbasis

Der in (2.9) definierte Jones Vektor bildet sich aus Einheitsvektoren im Sinn einer orthogonalen kartesischen Basis  $\{\Phi, \Theta\}$ . Transformiert man den Jones-Vektor beispielsweise in eine zirkuläre Polarisationsbasis, muss die euklidische Norm des Vektors erhalten bleiben. Dies kann durch Multiplikation mit einer unitären Matrix  $\mathbf{U}$  gemäß (2.11) gewährleistet werden.

$$\mathbf{E}_J^{\{u,v\}} = \mathbf{U} \mathbf{E}_J^{\{\Phi, \Theta\}} \quad (2.11)$$

In [12, 27] werden dazu drei Rotationsmatrizen der speziellen unitären Gruppe  $SU(2)$  zur Transformation genutzt. Dabei kann gezeigt werden, dass  $\mathbf{U}$  nach (2.12) aus  $\mathbf{U}(\alpha)$ ,  $\mathbf{U}(\beta)$  und  $\mathbf{U}(\varphi)$  gebildet werden kann, wobei die zugrundeliegenden Rotationsparameter mit den bereits eingeführten Eigenschaften der Polarisationsellipse übereinstimmen.

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}(\alpha, \beta, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & j \sin(\beta) \\ j \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\varphi} & 0 \\ 0 & e^{-j\varphi} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

**Tabelle 2.1.:** Ausgewählte Polarisationszustände [24]

Polarisation	Jones-Vektor $\mathbf{E}_J$	Orientierung $\alpha$	Elliptizität $\beta$
Linear $\Phi$ (Horizontal)	$\mathbf{E}_{J\Phi} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	0	0
Linear $\Theta$ (Vertikal)	$\mathbf{E}_{J\Theta} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{\pi}{2}$	0
Linear $+45^\circ$	$\mathbf{E}_{J+45} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$	$\frac{\pi}{4}$	0
Linear $-45^\circ$	$\mathbf{E}_{J-45} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$	$-\frac{\pi}{4}$	0
Zirkular im UZS	$\mathbf{E}_{JZ+} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ j/\sqrt{2} \end{bmatrix}$	$\left[-\frac{\pi}{2} \cdots \frac{\pi}{2}\right]$	$\frac{\pi}{4}$
Zirkular entgegen dem UZS	$\mathbf{E}_{JZ-} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ -j/\sqrt{2} \end{bmatrix}$	$\left[-\frac{\pi}{2} \cdots \frac{\pi}{2}\right]$	$-\frac{\pi}{4}$

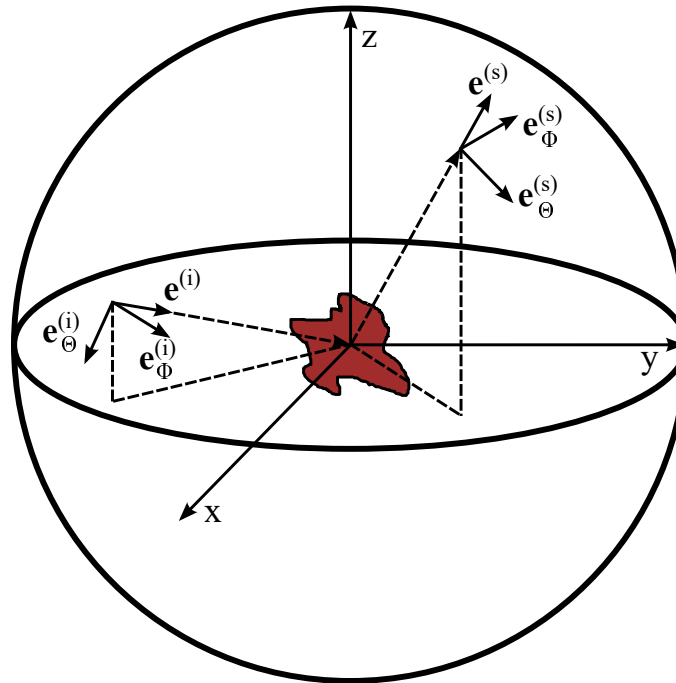
## 2.2. Streuung elektromagnetischer Wellen

Ändern sich die elektrischen oder magnetischen Eigenschaften des Ausbreitungsmediums, stellt dieser Übergang eine Grenzschicht für die sich ausbreitende Welle dar. Mithilfe von Grenzbedingungen der normalen und tangentialen Feldkomponenten am Übergang, lässt sich das Ausbreitungsverhalten für einfache Fälle analytisch berechnen. Die Mehrzahl der real auftretenden Grenzflächenprobleme führen jedoch aufgrund ihrer Geometrie und infolge mehrerer sich überlagernder Ausbreitungsphänomene zu komplexen Interaktionen zwischen Welle und Medium. Als allgemeine Modellvorstellung wird deshalb die Gesamtheit aller Interaktionsvorgänge zwischen Welle und Medium als „Sreuung“, „Streuvorgang“ oder „Streumechanismus“ zusammengefasst. Dabei führt das einfallende elektromagnetische Feld zur einer Beschleunigung von Ladungsträgern (oder einer Magnetisierung) auf der Oberfläche oder im Volumen des Objekts, welches sich im Ausbreitungsweg der Welle befindet. Diese Ladungsträgerbewegung führt wiederum zu einem Abstrahlen von elektromagnetischen Wellen. Das einfallende Feld erzeugt somit verschiede-

dene Anteile und wird entsprechend gestreut.

### 2.2.1. Rückstreugeometrie

Polarisation als räumlich-zeitliche Eigenschaft von elektromagnetischen Wellen erfordert eine genaue Definition räumlicher Bedingungen bei der Wellenausbreitung. Dazu gehören geeignete lokale Koordinatensysteme in denen einfallende und gestreute Wellen beschrieben werden können. Gemäß der physikalischen Wellenausbreitung ergeben sich damit zwei rechtshändige lokale Koordinatensysteme in einem globalen auf den Streumechanismus zentrierten System wie in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Einheitsvektoren, welche die Ausbreitungsebene bilden, stehen dabei senkrecht auf den Ausbreitungsrichtungen  $\mathbf{e}^{(i)}$  und  $\mathbf{e}^{(s)}$ . Die in Abbildung 2.2



**Abbildung 2.2.:** Rückstreugeometrie gemäß der physikalischen Wellenausbreitung: Die lokalen Koordinatensysteme entsprechen dem Bezugssystem der Vorwärts-Streuung.

dargestellt bistatische Geometrie folgt dabei dem Vorbild der Wellenausbreitung gemäß einer Vorwärts-Streuung. Dementsprechend sind beide Koordinatensysteme im Falle einer monostatischen Geometrie nicht identisch, da gilt:  $\mathbf{e}^{(i)} = -\mathbf{e}^{(s)}$ . Für die Definition von Jones-Vektoren ist dieser Vorzeichenunterschied der Bezugssysteme von einfallender und gestreuter Welle unvorteilhaft. Aus diesem Grund wird in der überwiegenden Mehrzahl der Textbücher über Radar-Polarimetrie die



Ausbreitungsrichtung der gestreuten Welle  $\mathbf{e}^{(s)}$  invertiert. Dieses Bezugssystem der Rückwärts-Streuung wird deshalb auch in dieser Arbeit verwendet.

### 2.2.2. Polarimetrische Streumatrix

Ein Streuvorgang kann somit als Ereignis angesehen werden, welches eine einfallende Welle in eine ausgehende Welle transformiert. Für die Beziehung der Jones-Vektoren beider Wellen, lässt sich dieses Ereignis als Transformation derer Vektorräume beschreiben. Dabei wird für zweizeilige Vektoren eine komplexe Transformationsmatrix der Dimension  $2 \times 2$  benötigt, welche polarimetrische Streumatrix  $\mathbf{S}$  genannt wird. Gemäß (2.13) dient diese einheitenlose Matrix der Verknüpfung des einfallenden und gestreuten Jones-Vektors. Zur Beschreibung des kopolaren Anteils der Rückstreuung, bei der die Art der Polarisierung erhalten bleibt, dienen die Elemente auf der Hauptdiagonalen der Streumatrix. Die Elemente der Gegendiagonalen definieren hingegen den Anteil der kreuzpolaren Rückstreuung. In diesem Zusammenhang muss für bistatische Geometrien angemerkt werden, dass wie in Abbildung 2.2 dargestellt in den meisten Konstellationen von Sende- und Empfangsebene nicht von entsprechend parallelen und orthogonalen Einheitsvektoren der Ebenen ausgegangen werden kann. Die Orientierung von Sende- und Empfangsantenne und insbesondere der geometrische Bezug zueinander trägt maßgeblich zur Gestalt einer Streumatrix bei, wobei in Unterabschnitt 2.2.4 dieser Zusammenhang genauer diskutiert wird. Für die Bezeichnung *kopolar* und *kreuzpolar* gilt deshalb die Festlegung, dass sie allgemein auch für Elemente der Haupt- und Gegendiagonalen im bistatischen Fall verwendet wird. Als Alternative Beschreibung mittels des Müller-Formalismus ergibt sich analog der Stokes-Vektor der ausfallenden Welle aus der Multiplikation von Kennaugh-Matrix und Stokes-Vektor der einfallenden Welle (siehe Abschnitt A). Da in dieser Arbeit ausschließlich der Jones-Formalismus angewendet wurde, beziehen sich sämtliche folgende Erläuterung auf die Streumatrix als Systemgröße.

$$\mathbf{E}_J^{(s)} = \begin{bmatrix} E_{\Phi}^{(s)} \\ E_{\Theta}^{(s)} \end{bmatrix} = \mathbf{S} \mathbf{E}_J^{(i)} = \begin{bmatrix} S_{\Phi\Phi} & S_{\Phi\Theta} \\ S_{\Theta\Phi} & S_{\Theta\Theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\Phi}^{(i)} \\ E_{\Theta}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Je nach Komplexität des Rückstreuvorgangs werden sich einzelne Rückstreumechanismen überlagern und in ihrer Gesamtheit die Streumatrix einer einzelnen Beobachtung bilden. Dabei lassen sich abhängig von der Anzahl sich überlagernder dominanter Mechanismen zwei unterschiedliche Modelle *kohärenter* und *inkohärenter* Streuung definieren, welche Auswirkung auf die statistischen Parameter der Streumatrix bei mehrmaliger Beobachtung nehmen.

- **Kohärente Rückstreuung**

Durch Vorhandensein eines einzelnen dominanten Rückstreumechanismus

bildet sich eine stabile Streumatrix mit geringer Standardabweichung der Einzelkomponenten aus. Bei mehrmaliger Beobachtung oder bei leichten Änderungen der Positionen der Antennen, treten kaum Änderungen der Rückstreuung auf. Insbesondere für Messsysteme hoher Bandbreite oder hoher Richtwirkung der Antennen spielt die Analyse eines Einzelmechanismus eine große Rolle bei der Extraktion von Objektinformationen, da in diesen Fällen aufgrund hoher räumlicher oder zeitlicher Auflösung der Messdaten nur eine geringe Anzahl verschiedener Mechanismen angeregt werden können.

- **Inkohärente Rückstreuung**

Durch Überlagerung zahlreicher Einzelmechanismen ergibt sich die Modellierung der Streumatrix als Zufallsprozess. Dabei wird angenommen, dass mithilfe von Mittelwertbildung über geeignete Messdimensionen eine stabile mittlere Streumatrix erfasst werden kann. Eine anschließende Extraktion von Objektinformationen basiert auf der Grundlage der Analyse der statistischen Eigenschaften abgeleiteter Darstellungsformen, welche in Unterabschnitt 2.3.1 beschrieben werden.

### 2.2.3. Streuvorgänge an kanonischen Objekten

Die genaue Gestalt der Streumatrix ist von zahlreichen physikalischen Eigenschaften wie Frequenz, Rückstreugeometrie oder Zeit (im Fall zeitvarianter Objekte) abhängig, welche sich in den jeweiligen Parametern des Messsystems wiederfinden. Insbesondere stellt die Interpretation einer ermittelten Streumatrix für ein Objekt mit komplexer Geometrie eine Herausforderung dar, da auftretende Einzelmechanismen vom Messsystem häufig nicht separiert werden können. Dennoch ist es in vielen Fällen sinnvoll bestimmte idealisierte kanonische Standardobjekte als Vergleichspunkt für die Interpretation einer beobachteten Rückstreuung zu nutzen.

Die folgenden kanonischen Objekte (unendlich hoher Leitfähigkeit) werden anhand ihrer normierten monostatischen Streumatrix in linearer Polarisationsbasis charakterisiert und dienen zur Definition verschiedenen Basisklassen für Streumechanismen. Mithilfe eines Orientierungswinkels  $\psi$  ist der Zusammenhang der Streumatrix mit der Rotation des Objekts um die Ausbreitungsrichtung dargestellt.

#### Wand, Kugel, Dreiflächiger Reflektor

Bei der zu erwartenden Rückstreuung an einer orthogonal zur Ausbreitungsrichtung orientierten Wand, welche eine unendliche Ausdehnung besitzt, tritt ein rein kopolares Verhalten auf. Identische Beobachtungen gelten für die Rückstreuung an einer Kugel oder einem dreiflächigen Reflektor (engl.: trihedral) in Normalausrichtung wie in Abbildung 2.3 dargestellt. Der zugrundeliegende Mechanismus wird

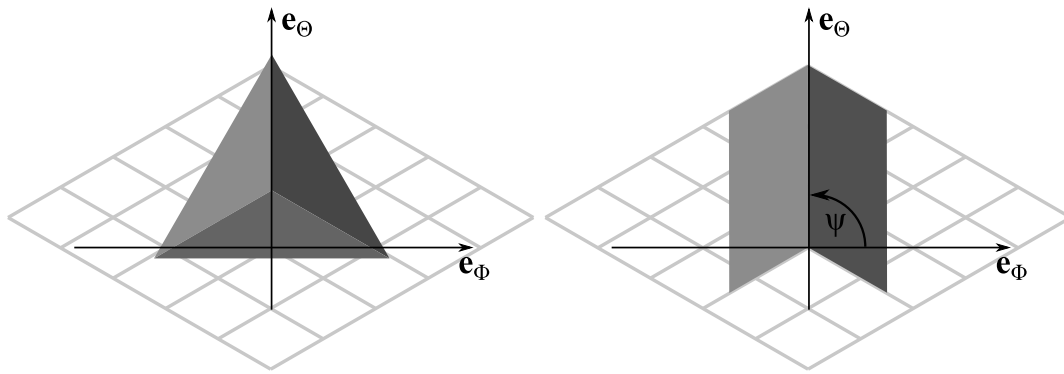
auch als *ungeradzahlige Reflexion* bezeichnet.

$$\mathbf{S}_{tri} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

### Zweiflächiger Reflektor

Die charakteristische Doppelreflexion an einem zweiflächigem Reflektor (engl.: dihedral) führt je nach Orientierung der Symmetrieebene des Reflektors orthogonal zur Polarisation zu einem  $\pi/2$  Phasensprung. Verallgemeinert tritt der selbe Mechanismus an Objekten mit zueinander orthogonal angeordneten Elementen für *geradzahlige Reflexionen* auf.

$$\mathbf{S}_{dih}(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(2\psi) & \sin(2\psi) \\ \sin(2\psi) & -\cos(2\psi) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$



(a) Dreiflächiger Reflektor

(b) Orientierter Zweiflächiger Reflektor

**Abbildung 2.3.:** Kanonische Objekte (1)

### Dipol

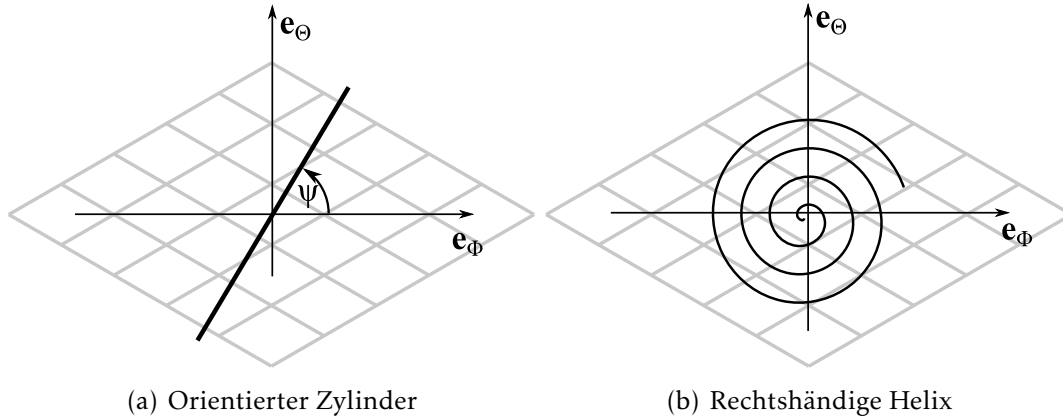
Ein in der Ausbreitungsebene platzierter dünner Zylinder zeigt ein für die parallel zu seiner Orientierung liegenden linearen Polarisation ein selektives Verhalten. Dabei wird ausschließlich in dieser Polarisation ein *Dipolmechanismus* angeregt, welcher vergleichbar zum abgestrahlten Feld einer Dipolantenne ist.

$$\mathbf{S}_{zyl}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos^2(\psi) & \frac{1}{2} \sin(2\psi) \\ \frac{1}{2} \sin(2\psi) & \sin^2(\psi) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

### Helix

Vergleichbar mit dem Rückstreuverhalten eines Zylinders für linear polarisierte Wellen, verhält sich der *Helixmechanismus* einer links- bzw. rechtshändigen Helix selektiv bei zirkularer Polarisationsbasis.

$$\mathbf{S}_{hel}(\psi) = \frac{e^{-j2\psi}}{2} \begin{bmatrix} 1 & \pm j \\ \pm j & -1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$



**Abbildung 2.4.:** Kanonische Objekte (2)

### Weitere Mechanismen

Außerdem existieren einige aus Linearkombination der bereits eingeführten kanonischen Streumatrizen zusammengesetzten Mechanismen, welche in einigen seltenen Fällen zur Interpretation von Radar-Daten herangezogen werden, bzw. das Rückstreuverhalten eines realen Objekts näherungsweise beschreiben. Als  $\lambda/4$ -Mechanismus (engl.: quarter wave device mechanism) bezeichnet man die Streumatrix zweier orthogonal und leicht versetzt zueinander angeordneter Dipole, deren Form in Gleichung 2.18 gegeben ist [28, 29].

$$\mathbf{S}_{\lambda/4}(\psi) = \mathbf{S}_{zyl}(\psi) + j\mathbf{S}_{zyl}(\psi + 90^\circ) \quad (2.18)$$

Die Polarisationsselektivität eines realen geraden Stabs ist abhängig von dessen Umfang, da mit zunehmendem Radius ein Wandmechanismus in höherem Maß zur resultierenden Streumatrix beiträgt. Sind beide Mechanismen gleichermaßen vorhanden kann die Streumatrix entsprechend Gleichung 2.19 definiert werden. Weiterhin können mit  $\mathbf{S}_{zyl,real}$  auch Asymmetrien zwischen den kopolaren Anteilen eines Wandmechanismus modelliert werden.

$$\mathbf{S}_{zyl,real}(\psi) = \mathbf{S}_{tri} + \mathbf{S}_{zyl}(\psi) \quad (2.19)$$

In gleicher Weise kann der Mechanismus einer Doppelreflexion mit leichter Asymmetrie durch eine Überlagerung mit einem zusätzlichen Dipolmechanismus erzeugt werden.

$$\mathbf{S}_{dih,real}(\psi) = \mathbf{S}_{dih}(\psi) + \mathbf{S}_{zyl}(\psi) \quad (2.20)$$

### Symmetrie und Ähnlichkeit der Streumatrix

In Normalausrichtung  $\psi = 0$  von Zylinder und zweiflächigem Reflektor sowie für die Kugel ergeben sich Diagonalmatrizen  $\mathbf{S}_{D_x}$  mit  $x \in \{tri, dih, zyl\}$ . In diesem Fall ist der kopolare Anteil des Mechanismus maximiert und kreuzpolare Anteile verschwinden vollständig. Da eine monostatische Streumatrix  $\mathbf{S}$  in der überwiegenden Mehrheit komplexwertige und symmetrische Eigenschaften aufweist, lässt sie sich in eine unitäre Matrix  $\mathbf{U}$  und eine Diagonalmatrix  $\mathbf{S}_D$  gemäß (2.21) zerlegen. Dadurch besteht Ähnlichkeit zwischen Diagonalmatrix und Streumatrix, welche somit diagonalisierbar ist [30, 31] (Abschnitt A).

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}^{-1} \mathbf{S}_D \mathbf{U} \quad (2.21)$$

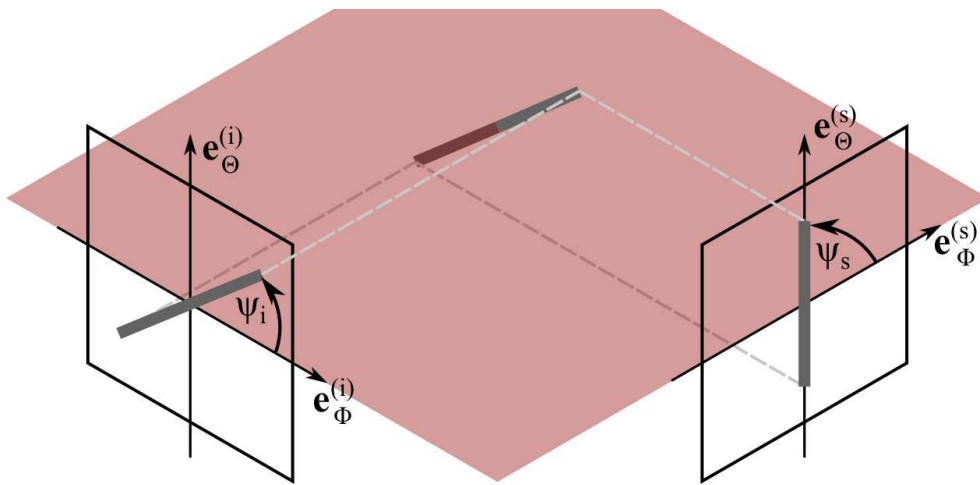
Anhand der Lage des kanonischen Objekts im Raum lässt sich dieser Sachverhalt mit einer Hauptachsentransformation vergleichen, wobei die Bezugsachsen der polarimetrischen Einheitsvektoren auf die physikalisch vorhandene Symmetrieachse des Objekts ausgerichtet werden. Dabei ist der Begriff der *Symmetrie* mehrdeutig verwendet als Eigenschaft eines Objekts oder einer Matrix. Dieser Sachverhalt wird in einigen Zerlegungsmethoden für die Ableitung von Objekteigenschaften herangezogen. Insbesondere nimmt die Cameron-Zerlegung eine stufenweise Analyse der symmetrischen und unsymmetrischen Anteile der Streumatrix vor, wobei in kartesischer Koordinatenbasis Objektsymmetrie und Matrixsymmetrie für Objekte vorhanden sind, deren Streumatrix durch Gleichung 2.21 mit einer 2x2 Rotationsmatrix  $\mathbf{U}(\psi)$  diagonalisierbar sind. Im Fall des Helixmechanismus kann dies beispielsweise nicht nachgewiesen werden.

### 2.2.4. Allgemeines Rückstreumodell

In der Analyse polarimetrischer Messdaten spielen die Streumechanismen kanonischer Objekte eine maßgebliche Rolle in der Interpretation komplexerer Vorgänge. Die in Unterabschnitt 2.2.2 eingeführten Konzepte *kohärenter* und *inkohärenter* Streuung bilden sich direkt in die Signalverarbeitungsalgorithmen zur Zerlegung gemessener Streumatrizen in Einzelmechanismen bzw. in der Analyse deren statistischer Eigenschaften ab. Aus dem umgekehrten Blickwinkel der Synthese einer Streumatrix benötigt man einen Satz von Parametern zur Definition überlagerter Einzelmechanismen und ein geeignetes Modell zur Umsetzung der Parameter.

Für den normalen Anwendungsfall der polarimetrischen Fernerkundung spielt die Analyse und damit die Zuordnung physikalischer Eigenschaften zu beobachteten Streuvorgängen die dominantere Rolle. Für kohärente sowie inkohärente Streuung entstanden je nach spezifischen Anwendungsfall zahlreiche Zerlegungsverfahren mit unterschiedlichem Umfang an Parametern und auflösbaren Einzelmechanismen, wobei Unterabschnitt 2.3.2 eine Übersicht der Methoden bietet. Die folgenden Ausführungen dienen der Einführung eines Objektmodells zur Synthese einer Streumatrix, welches dem von Huynen entwickelten Zerlegungsverfahren entnommen ist.

### Projektion eines Streumechanismus



**Abbildung 2.5.:** Veranschaulichung der Projektion eines Zylinders in Sende- und Empfangsebene der Antennen.

Die in (2.15) - (2.17) definierten Streumechanismen beziehen sich auf monostatische Radar-Systeme mit dem Bezugssystem der Rückwärts-Streuung. Besondere Bedeutung bei der Verwendung von Jones-Vektoren für die Beschreibung von Polarisationszuständen kommt der Ausbreitungsebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung zu, da ein eigentlich dreidimensionaler Streumechanismus als Projektion auf diese Ebene verstanden wird. Je nach verwendeter Antenne, spielt deren Orientierung bzw. Rotation um die Ausbreitungsrichtung sowie die Positionierung des Objekts eine maßgebliche Rolle, in welcher Form eine Projektion des Streumechanismus in der Ausbreitungsebene beobachtet wird. Eine mechanische oder elektrische Rotation der Polarisationsbasis kann dabei als gleichbedeutend einer Rotation des Objekts um die selbe Achse angenommen werden. Für bistatische Radar-Systeme, wie sie insbesondere bei der UWB-Nahbereichserkundung eingesetzt werden, müs-

sen somit die Ausbreitungsebenen von Sendeantenne (Sendeebene) und Empfangsantenne (Empfangsebene) für die Anregung und Beobachtung eines Rückstreumechanismus berücksichtigt werden. In Abbildung 2.5 ist dazu das Beispiel eines Zylinders dargestellt, welcher aufgrund der Orientierung im Raum unterschiedliche Projektionen in Sende- und Empfangsebene erzeugt. Ob eine Streumatrix vom Beobachtungsort gemessen werden kann, hängt somit auch davon ab ob ein Streumechanismus sendeseitig angeregt wird [32, 33].

### Parametrisches Objektmodell nach Huynen

Aufgrund der unterschiedlichen Referenzsysteme kann eine gemessene Streumatrix im bistatischen Fall nicht mehr als symmetrisch angenommen werden. Folgt man einer Grundidee des phänomenologischen Konzept Huynens, wonach das letztendlich beleuchtete Objekt physisch erhalten bleibt und demnach der Streumechanismus lediglich aus einem anderen Aspektwinkel beobachtet wird, ergibt sich die gemessene Streumatrix des in Abbildung 2.5 dargestellten Objekts durch geeignete Rotation der kanonischen Streumatrix anhand geometrischer Begebenheiten des Messszenarios.

In seiner wegweisenden Dissertation zeigte *Jean Richard Huynen*, bereits 8 Jahre bevor der erste mit bildgebender Mikrowellenmesstechnik ausgestattete Satellit das Zeitalter der weltraumgestützten Fernerkundung einläutete, ein Modell für die komplette Beschreibung kohärenter Rückstreuung eines einzelnen Streumechanismus in Bezug auf seine kanonischen Einzelkomponenten [12]. Mithilfe eines Satzes von 6 Parametern, welche später als *Huynen-Euler Parameter* bezeichnet wurden, ergibt sich mit (2.22) eine allgemeinen Beschreibung eines Streumechanismus in bistatischer Geometrie.

$$\mathbf{S} = \mathbf{R}(\psi_2) \mathbf{H}(\chi_2) \mathbf{S}_D \mathbf{H}^*(\chi_1) \mathbf{R}^*(\psi_1) \quad (2.22)$$

Mit der Diagonalmatrix  $\mathbf{S}_D$  in (2.23) wird die Gestalt des zugrundeliegenden Streumechanismus mit den Größen des Reflexionswinkels  $\nu$  (engl.: skip angle) und des charakteristischen Winkels  $\gamma$  modelliert.  $\nu \in [-\pi/2, \pi/2]$  beschreibt dabei den Phasensprung zwischen den orthogonalen Feldkomponenten nach einer Reflexion.  $\gamma \in [0, \pi/4]$  definiert die Polarisationsselektivität des Objekts. Weiterhin wird der Mechanismus mit Magnitude  $m_S$  und zufälliger Phase  $\varphi$  ausgedrückt. Zur Veranschaulichung anhand von Beispielen ist in Tabelle 2.2 einer Übersicht der Huynen-Euler-Parameter kanonischer Objekten gegeben.

$$\mathbf{S}_D = m_S e^{j\varphi} \begin{bmatrix} e^{j2\nu} & 0 \\ 0 & e^{-j2\nu} \tan^2(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Die Helizitätsmatrix  $\mathbf{H}$  und die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  beschreiben dabei mit den Parametern  $\chi \in [-\pi/4, \pi/4]$  und  $\psi \in [-\pi/4, \pi/4]$  die Symmetrieeigenschaften und die

Orientierung des Mechanismus aus dem jeweiligen Aspektwinkel der Antennen.

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\mathbf{H}(\chi) = \begin{bmatrix} \cos(\chi) & j \sin(\chi) \\ j \sin(\chi) & \cos(\chi) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Für monostatische Geometrien gemäß Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4 ergeben sich die in Tabelle 2.2 dargestellten Parameter. Die Huynen-Euler Parameter sind zudem Gegenstand einer Zerlegung, wobei deren Bestimmungsgleichungen aus unterschiedlichen Darstellungsformen der Streumatrix ableitbar sind und für sich genommen einen komplexen Gegenstand zahlreicher Publikationen darstellen. In der Mehrheit der Textbücher dient die Zerlegung der Erläuterung grundlegender polarimetrischer Konzepte, welche sich in anderen anwendungsspezifischen Zerlegungsmethoden widerspiegeln. Da der Fokus dieser Arbeit auf Möglichkeiten der Objektseparierung mit nicht-orthogonalen Streumatrizen liegt, wird für eine ausführliche Darstellung der Huynen-Euler-Zerlegung auf [12, 34] verwiesen.



**Tabelle 2.2.:** Huynen-Euler-Parameter kanonischer Objekte

Objekt	Streumatrix $\mathbf{S}$	$\nu$	$\gamma$	$\chi$	$\psi$
Zylinder	$\mathbf{S}_{zyl}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0	0	0	0
Zylinder	$\mathbf{S}_{zyl}(\frac{\pi}{4}) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$	0	0	0	$\frac{\pi}{4}$
Zylinder	$\mathbf{S}_{zyl}(\frac{\pi}{2}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	0	0	0	$\frac{\pi}{2}$
Zweiflächiger Reflektor	$\mathbf{S}_{dih}(0) = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0	0
Zweiflächiger Reflektor	$\mathbf{S}_{dih}(\frac{\pi}{4}) = \begin{bmatrix} 0 & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{4}$
Zweiflächiger Reflektor	$\mathbf{S}_{dih}(\frac{\pi}{2}) = \begin{bmatrix} -1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{2}$
Kugel	$\mathbf{S}_{tri} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$	0	$\frac{\pi}{4}$	0	0

## 2.3. Polarimetrische Signalverarbeitung

### 2.3.1. Darstellungsformen polarimetrischer Daten

#### Basis der Streumatrix

Gemäß der Standard-Einheitsmatrizen des  $2 \times 2$ -Matrizenraums bildet sich eine Streumatrix als Linearkombination ihrer Komponenten mit der jeweiligen Einheitsmatrix aus (2.26) zu  $\mathbf{S} = S_{\Phi\Phi}\mathbf{E}_{11} + S_{\Phi\Theta}\mathbf{E}_{12} + S_{\Theta\Phi}\mathbf{E}_{21} + S_{\Theta\Theta}\mathbf{E}_{22}$ .

$$\mathbf{E}_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Für die Analyse kanonischer Streumechanismen ist die *Pauli-Basis* bestehend aus vier Einheitsmatrizen von besonderer Bedeutung in der Radar-Polarimetrie.

$$\sigma_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sigma_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sigma_2 = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}, \sigma_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

In Abschnitt 2.3.2 wird dazu eine kohärente Zerlegungsmethode diskutiert, welche die Streumatrix als Linearkombination von Pauli-Koeffizienten  $k_n$  mit den Einheitsmatrizen aus (2.27) darstellt.

#### Polarimetrische Kovarianz- und Kohärenzmatrix

Zur Analyse von Streumechanismen des in Unterabschnitt 2.2.2 eingeführte Konzepts kohärenter Rückstreuung eignet sich die Auswertung der Eigenschaften einer gemessenen Streumatrix  $\mathbf{S}$ , sofern nur einzelne Mechanismen zu ihrer Form beitragen. Je nach Auflösung des Radar-Systems oder der inhärent vorhandenen Dynamik des beleuchteten Objekts, kommt es jedoch in vielen Fällen zu einer Überlagerung verschiedener Rückstreuungsvorgänge, wodurch eine Stationarität der Streumatrix nicht mehr angenommen werden kann. In diesen Fällen *inkohärenter* Rückstreuung müssen die Elemente der Streumatrix als stochastische Prozesse angenommen werden. Ihre Eigenschaften werden entsprechend mit geeigneten statistischen Methoden ausgewertet.

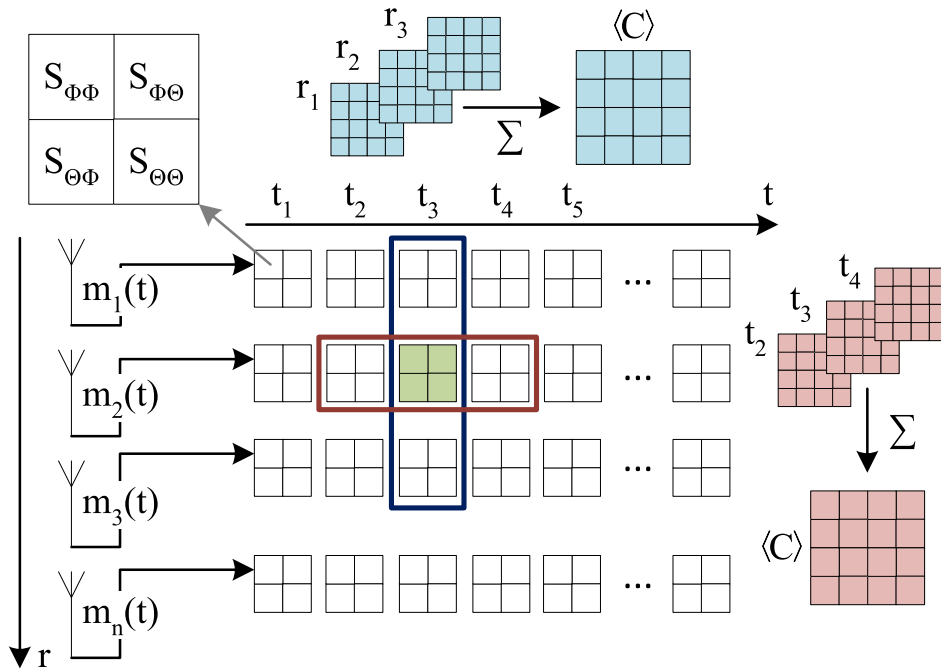
Dazu wird durch Vektorisierung der Streumatrix ein Zufallsvektor in Form des Streuvektors  $\mathbf{s}$  gemäß (2.28) gebildet. Statistische Abhängigkeiten sowie die Streuung der Elemente von  $\mathbf{s}$  können durch Auswertung seiner Kovarianzmatrix untersucht werden.

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} S_{\Phi\Phi} \\ S_{\Theta\Phi} \\ S_{\Theta\Phi} \\ S_{\Theta\Theta} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Diese definiert sich durch die Differenz des Erwartungswerts des Produkts aus Zufallsvektor und seiner Adjungierten  $E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^H\}$  und dem Produkt ihrer einzelnen Erwartungswerte  $E\{\mathbf{s}\}E\{\mathbf{s}^H\}$ . Durch Realisierung des Erwartungswerts durch Mittelung in zeitlicher oder räumlicher Dimension und dem Vorhandensein eines zufälligen Phasenterms der Streumatrix, entfällt der zweite Faktor, wodurch die *polarimetrische Kovarianzmatrix*  $\mathbf{C}$  gemäß (2.29) definiert ist.  $\langle \square \rangle$  kennzeichnet wie in Abbildung 2.6 dargestellt die Mittelung über eine endliche Anzahl zeitlicher oder räumlicher Werte der Kovarianzmatrix.

$$\mathbf{C} = \langle \mathbf{s} \cdot \mathbf{s}^H \rangle \quad (2.29)$$

Bezüglich der gebildeten  $4 \times 4$ -Matrix ergeben sich stets hermitesche und positiv se-



**Abbildung 2.6.:** Veranschaulichung der Berechnung der polarimetrischen Kovarianzmatrix: Die Wahl der Mittelungsdimension sowie die Anzahl der Mittelungen sind Freiheitsgrade bei der Bestimmung der mittleren Kovarianzmatrix.

midefinite Eigenschaften, wodurch  $\mathbf{C}$  reelle Eigenwerte größer oder gleich null und orthogonale Eigenvektoren besitzt. Diese beinhalten maßgebliche polarimetrische Informationen und sind zentraler Bestandteil inkohärenter Zerlegungsverfahren. Eine zentrale Eigenschaft, welche maßgeblich zum Verständnis der enthaltenen Information beiträgt, betrifft die Art der vorgenommenen Mittelungsoperation bei der Generierung der Kovarianzmatrix. Zunächst führt die Berechnung der einzel-

nen  $4 \times 4$  Matrix zum Wegfall der absoluten entfernungsabhängigen Phaseninformationen der zugrundeliegenden Streumatrix. Lediglich die relativen Phasenbezügen zwischen den Elementen der Streumatrix pflanzen sich in die Elemente der Kovarianzmatrix fort. Eine anschließende Mittelung in räumlicher oder zeitlicher Dimension stellt eine Operation vergleichbar mit einer Tiefpassfilterung dar, wobei eine Verringerung der Auflösung der Radar-Daten nicht zu verhindern ist. Zerlegt man  $\mathbf{C}$  gemäß Gleichung 2.30 in eine reellwertige Diagonalmatrix  $\Sigma$  und eine Matrix  $\mathbf{V}$ , so stellen die Diagonalelemente von  $\Sigma$  die Eigenwerte und die Spaltenvektoren von  $\mathbf{V}$  die Eigenvektoren der Kovarianzmatrix dar.

$$\mathbf{C} = \mathbf{V} \Sigma \mathbf{V}^H \quad (2.30)$$

Die Verteilung und Form der Eigenwerte und -vektoren spiegelt dabei direkt die Gestalt der verschiedenen gemittelten Einzelmatriizen wider. Bei der Analyse polarimetrischer Satellitenbildern werden Mittelungsoperationen gewöhnlich auf benachbarte polarimetrische Pixel im Bildbereich angewendet, wodurch folglich die Nachbarschaftsverhältnisse nebeneinander liegender Bildbereich durch eine Untersuchung des Eigenwertproblems analysiert werden. Eine Mittelung über verschiedene Zeitpunkte der Messung eines inhärent zeitvarianten Objekts, würde hingegen Informationen über die zeitliche Historie der Rückstreuvorgänge am Objekt beinhalten. Damit eröffnen sich allein durch geschickte Wahl von Dimension und Fenstergröße der Mittelung eine große Vielfalt an unterschiedlichen Informationen inkohärenter Rückstreuvorgänge. Die Wahl der Basis des Streuvektors nach (2.27) ermöglicht außerdem eine alternative Definition (2.31) eines *Pauli*-Vektors  $\mathbf{s}_P$  als Streuvektor.

$$\mathbf{s}_P = \begin{bmatrix} S_{\Phi\Phi} + S_{\Theta\Theta} \\ S_{\Phi\Phi} - S_{\Theta\Theta} \\ S_{\Phi\Theta} + S_{\Theta\Phi} \\ j(S_{\Phi\Theta} - S_{\Theta\Phi}) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Dieser kann folglich zur Definition einer weiteren Kovarianzmatrix (2.32) herangezogen werden, welche in der Fernerkundung als *polarimetrische Kohärenzmatrix*  $\mathbf{T}$  bezeichnet wird.

$$\mathbf{T} = \langle \mathbf{s}_P \cdot \mathbf{s}_P^H \rangle \quad (2.32)$$

### 2.3.2. Polarimetrische Zerlegungsverfahren

Eine ganzheitliche Beschreibung der komplexen Rückstreuverhältnisse und ursächlichen Eigenschaften der elektromagnetischen Umgebung ist in der Regel aufgrund der Unterbestimmtheit des zugrundeliegenden inversen Problems nicht möglich. Dennoch gelingt es durch Auswertung polarimetrischer Radar-Daten grundsätzliche physikalische Begebenheiten mittels verschiedener Zerlegungsverfahren zu un-

tersuchen. Dabei handelt es sich um die Einordnung der Messdaten in die vereinfachten Modelle kohärenter und inkohärenter Rückstreuung kanonischer Objekte, welche auf unterschiedlichen Konzepten und Darstellungsformen der Radar-Daten aufbauen. Die Arbeiten von Huynen begründen dabei den Ursprung einer Vielzahl verschiedener Ansätze zur physikalischen Interpretation der Streumatrix.

Bei der Anwesenheit eines einzelnen Objekts kann eine Interpretation im einfachsten Fall über den Vergleich gemessener und kanonischer Streumatrizen gewährleistet werden. Daher definiert sich die Gruppe kohärenter Zerlegungsverfahren über die Synthese einer Streumatrix aus gewichteten Einzelmatrizen kanonischer Komponenten. Bei der Überlagerung mehrerer Rückstreumechanismen innerhalb einer Entfernungszelle kann es zu starken Abweichungen der Streumatrix bei mehrmaliger Beobachtungen kommen, wodurch eine stochastische Modellierung der zugrundeliegenden Prozesse nötig wird. In diesem Fall findet eine Untersuchung der gemittelten Kovarianz- bzw. Kohärenzmatrix statt. Modellbasierte inkohärente Zerlegungsverfahren bieten dabei analog zu kohärenten Verfahren eine Synthese von  $\mathbf{C}$  bzw.  $\mathbf{T}$  mittels gewichteter Überlagerung kanonischer Basismatrizen. Eine weitere Gruppe basiert auf der Analyse ihrer Eigenwerte und Eigenvektoren, wobei die Identifikation konkreter kanonischer Mechanismen sowie die Extraktion statistischer Parameter wie Zufälligkeit oder die Verteilung verschiedener Prozesse innerhalb der Kohärenzmatrix im Vordergrund stehen.

Bezogen auf Anwendungen der satellitengestützten Fernerkundung mittels SAR-Bildgebung existieren zahlreiche Publikationen, welche einen Überblick zu Verfahren und der Motivation hinter den spezifischen Anwendungsfällen geben [35–38]. Im Bereich der RCS-Bildgebung wurde zudem eine umfassende Thematisierung polarimetrischer Zerlegungsmethoden, insbesondere zur Huynen-Euler Zerlegung, durch *Dallmann* vorgelegt [34].

#### Kohärente Zerlegung der Streumatrix

Unter Nutzung der in Gleichung 2.27 definierten Pauli-Basis, lässt sich die Streumatrix  $\mathbf{S}$  als Linearkombination der Pauli-Matrizen gemäß Gleichung 2.33 darstellen.

$$\mathbf{S} = k_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + k_2 \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + k_3 \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix} + k_4 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Die resultierenden Parameter der *Pauli-Zerlegung* ergeben sich damit direkt aus den Elementen der Streumatrix, wodurch sich der größte Vorteil dieser Zerlegung in deren einfacher Berechnung begründet. Insgesamt lassen sich 3 Komponenten unterscheiden:

- geradzahlige Reflexion:  $k_4$  und  $k_2$  beschreiben die Magnituden der Mechanismen eines zweiflächigen Reflektors mit Orientierung  $0^\circ$  oder  $90^\circ$  bzw.  $\pm 45^\circ$ ,

- ungeradzahlige Reflexion:  $k_1$  bezieht sich auf die Magnitude des Mechanismus einer Kugel,
- unsymmetrische Komponenten:  $k_3$  bezieht sich auf unsymmetrische Komponenten der Streumatrix

Der offensichtliche Nachteil der Pauli-Zerlegung besteht in der fehlenden Möglichkeit der Auflösung der Orientierung geradzahliger Reflexionen. Weiterhin wird ein beliebig orientierte Dipol von  $k_1$  und  $k_2$  mehrdeutig erfasst.

Mit der *Krogager*-Zerlegung wird die Streumatrix eines symmetrischen Ziels zerlegt, welche demnach mithilfe einer Matrixrotation diagonalisierbar ist. In [39] wird die Vorschrift zur Bestimmung der einzelnen Parameter gegeben, wobei gemäß Gleichung 2.34 drei Einzelkomponenten voneinander getrennt werden können:

- geradzahlige Reflexion:  $k_{tri}$  bezieht sich auf die Magnitude des Mechanismus einer Kugel,
- ungeradzahlige Reflexion:  $k_{dih}$  und  $\psi$  beziehen sich auf die Magnitude und Orientierung des Mechanismus eines Doppelreflektors,
- Helixmechanismus:  $k_{hel}$  beschreibt die Magnitude eines Helixmechanismus

$$\mathbf{S} = \mathbf{R}^H \mathbf{S}_D \mathbf{R} = k_{tri} \mathbf{S}_{tri} + e^{j\delta_s} (k_{dih} \mathbf{S}_{dih}(\psi) + k_{hel} \mathbf{S}_{hel}(0)) \quad (2.34)$$

Im Vergleich zur Pauli-Zerlegung bietet das Verfahren von Krogager die Auflösung der Orientierung des Mechanismus geradzahliger Reflexionen. Weiterhin bezeichnet der Parameter  $\delta_s$  die Verschiebung von Kugel- und Doppelreflektor- bzw. Kugel- und Helixmechanismus innerhalb einer Entfernungszelle. Aufgrund fehlender Freiheitsgrade lässt sich die Verschiebung von Helix- und Doppelreflektormechanismus nicht messtechnisch ermitteln. Besondere Anwendung findet die Krogager-Zerlegung aufgrund guter Kontrastverhältnisse bei der Analyse des Bauzustands innerhalb städtischer Areale [24], da künstliche Strukturen häufig eine Transformation linear einfallender Wellen in zirkulare Polarisation vornehmen, wobei dieses Verhalten durch den Helixmechanismus beschrieben wird.

$$\begin{aligned} \mathbf{S} = & k_{tri} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ & + e^{j\delta_s} k_{dih} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(2\psi) & \sin(2\psi) \\ \sin(2\psi) & -\cos(2\psi) \end{bmatrix} \\ & + e^{j\delta_s} k_{hel} \begin{bmatrix} 1 & \pm j \\ \pm j & -1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Die Arbeiten von *Cameron* et al. bieten umfangreiche Konzepte und Werkzeuge mit deutlichem Bezug zur Huynen-Euler-Zerlegung, welche detailliert in [28] dargestellt sind. Bezogen auf die Extraktion physikalischer Objekteigenschaften wird eine mehrstufige Analyse der Streumatrix vorgeschlagen, wobei im ersten Schritt das Vorhandensein fehlender Reziprozität der Messung angenommen wird. Dies kann durch atmosphärische Effekte, nichtlineare Materialeigenschaften oder im einfachsten Fall Rauscheinflüsse hervorgerufen werden. Gleichung 2.36 nimmt daher eine Zerlegung in einen reziproken und nicht-reziproken Anteil von  $\mathbf{S}$  vor.

$$\mathbf{S} = m_S (\cos(\theta_r) \mathbf{S}_r + \sin(\theta_r) \mathbf{S}_{\bar{r}}) \quad (2.36)$$

Der extrahierte reziproke Anteil, wird anschließend anhand seiner Symmetrieeigenschaften in eine maximal und minimal symmetrische Komponente gemäß Gleichung 2.37 zerlegt.

$$\mathbf{S}_r = \cos(\tau_s) \mathbf{S}_s^{max} + \sin(\tau_s) \mathbf{S}_s^{min} \quad (2.37)$$

$\mathbf{S}_s^{min}$  dient anschließend der Auswertung hinsichtlich eines vorhandenen Helixmechanismus bzw. sonstiger asymmetrischer Komponenten. In [29] wird der Zerlegungsparameter  $z$  mit  $|z| < 1$  eingeführt, welcher den kanonischen Rückstreumechanismus der maximal symmetrischen Streumatrixkomponente  $\mathbf{S}_s^{max}$  nach Gleichung 2.38 bezeichnet.

$$\mathbf{S}_s^{max} = a e^{j\phi} \mathbf{R}(\psi) \Gamma(z) \quad (2.38)$$

mit

$$\Gamma(z) = \frac{1}{\sqrt{1+|z|^2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ z \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Analog zur Huynen-Euler-Zerlegung ist es auf Grundlage der Cameron-Zerlegung möglich eine Streumatrix in die nach Gleichung 2.14 bis Gleichung 2.20 eingeführten Basismechanismen zu zerlegen. Cameron bietet weiterhin eine Klassifikationsvorschrift für die Zuordnung polarimetrischer Radar-Daten zu 11 verschiedenen Klassen, wobei durch den stufenweisen Ansatz sogar die Analyse überlagelter Streumechanismen teilweise ermöglicht wird.

Die bisher aufgeführten Zerlegungsmethoden sollen lediglich der Veranschaulichung des Prinzips kohärenter Zerlegung dienen und stellen nur eine kleine Auswahl verschiedener Verfahren aus diesem Bereich dar. Zum genauen Ablauf der Berechnung der zugrundeliegenden Parameter wird deshalb auf die angegebenen Veröffentlichungen verwiesen. Einige Zerlegungsformen wie die auf Polarzerlegung der Streumatrix beruhenden Methoden von Carrea werden in dieser Arbeit nicht

betrachtet [40]. Weiterhin wurde die umfangreiche Gruppe der mit der Huynen-Euler-Zerlegung verwandter Verfahren bereits in anderen Arbeiten sehr detailliert diskutiert [34], wodurch zahlreiche Methoden in dieser Arbeit nicht behandelt werden. Insbesondere die Untersuchungen von Holm und Barnes identifizieren Mehrdeutigkeiten und Herausforderungen in der Interpretation des Modells nach Huynen [41]. Einige dieser Probleme werden durch Dallmann et al. in einer Zerlegung auf Grundlage der Parameter der Polarisationsellipse aufgelöst, wobei analog zu Camerons Verfahren eine umfangreiche Unterscheidung kanonischer Mechanismen ermöglicht wird [42].

### Modellbasierte inkohärente Zerlegung der Kovarianzmatrix

Aufgrund der bereits beschriebenen Konsequenzen aus der Überlagerung zahlreicher Streuvorgänge, dienen zur Untersuchung inkohärenter Mechanismen die Kovarianzmatrix  $C$  bzw. Kohärenzmatrix  $T$  in Verbindung mit einer geeigneten Mittelungsoperation. Grundlegend gliedern sich die Verfahren in *modellbasierte Methoden*, welchen die Parameter eines vorgegebenen Rückstreumodells an eine Messung anpassen, und in Methoden basierend auf einer *Eigenwertzerlegung*, welche im nächsten Unterabschnitt behandelt werden.

Insbesondere im Fall bestimmter Anwendungen der Erdbeobachtung wurden zahlreiche Rückstreumodelle im Bereich der Auswertung von Landnutzung, Vegetationszustand oder der Schätzung von Biomasse durch *Freeman und Durden et al.* sowie *van Zyl et al.* entwickelt. Konkrete Fragestellungen betreffen dabei die Analyse natürlicher Strukturen und Landschaften in Bezug auf Klassifikation der Bodennutzung, der Bewuchshöhe von Waldgebieten oder der Schätzung der Bodenfeuchtigkeit [43–47]. Besonders angetrieben durch zunächst luft- später welt-raumgestützte polarimetrische Radar-Systeme des Jet Propulsion Laboratory der NASA in den 80er bzw. Anfang der 90er Jahre, entstanden in diesem Umfeld zahlreiche Messdaten zur Erdbeobachtung. Van Zyl und Zebker untersuchten mithilfe unüberwachter Klassifikationsmethoden (Clustering) typische Formen der Kovarianzmatrix, wobei neben der Zuordnung von Vegetationsarten auch die Unterscheidung benachbarter Bildbereiche nicht orthogonaler polarimetrischer Signaturen untersucht wurden [48, 49]. Die Klassifikationsergebnisse zeigten Gruppen ähnlicher Rückstreuung, welche Mechanismen gerad- und ungeradzahlgiger Reflexionen bzw. diffuser Komponenten zugeordnet werden konnten.

Freeman und Durden extrahierten Modellparameter für zahlreiche Landschafts- und Vegetationsklassen wie Sumpf, Plantagen, Regenwald, gerodeten Wald u.v.m, wobei die beobachteten Streuvorgänge durch 3 Komponenten mit insgesamt 5 Parametern modelliert werden können. Die Interaktionen mit Blättern und Zweigen der Baumkronen werden als Volumenstreuung  $\{V\}$  an gleichverteilt ausgerichteten kleinen Dipolen beschrieben. Zusätzlich kommt es zu Doppelreflexionen  $\{D\}$  an Bo-



den und Baumstamm bzw. größeren Ästen und als dritte Komponente zur Reflexion an der Oberfläche des Erdbodens  $\{S\}$ . Nach erfolgter Mittelung wird zudem angenommen, dass keine Korrelation zwischen ko- und kreuzpolaren Kanälen besteht, wodurch sich eine Kovarianzmatrix  $C_{F,D}$  gemäß Gleichung 2.40 ergibt.

$$\begin{aligned} C_{F,D} &= C_V + C_D + C_S \\ &= \frac{f_V}{8} \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{bmatrix} + f_D \begin{bmatrix} \alpha_{F,D}^2 & 0 & -\alpha_{F,D} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_{F,D} & 0 & 1 \end{bmatrix} + f_S \begin{bmatrix} \beta_{F,D}^2 & 0 & \beta_{F,D} \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta_{F,D} & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Insgesamt bietet eine Messung 4 unabhängige Gleichungen, welche durch 5 Parameter beschrieben werden. In Arbeiten von van Zyl et al. konnte empirisch ermittelt werden, dass der dominante Mechanismus je nach Bewuchs entweder Boden- oder Doppelreflexion zugeordnet werden kann [50]. Damit werden  $\alpha_{F,D}$  und  $\beta_{F,D}$  in einem ersten Verarbeitungsschritt je nach Vorzeichen von  $\langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle$  auf 0 bzw. 1 gesetzt [48]. Da der Anteil der Volumenstreuung sofort bestimmt und von den restlichen Komponenten subtrahiert werden kann, ist die Berechnung aller Komponenten sehr einfach durchführbar. Im Vergleich zu kohärenten Zerlegungen bietet der gebildete  $f_V - f_D - f_S$ -Parameterraum keine Synthese einer bestimmten Streumatrix, sondern vielmehr die Zuordnung der mittleren Rückstreuung einer bestimmten Anzahl an Beobachtungen zu den zuvor festgelegten Modellkomponenten.

Zur Analyse natürlicher Strukturen bietet die 3-Komponenten-Zerlegung eine gute Anpassung an gemessene Radar-Daten, wohingegen bei Fragestellungen von Landschaftsplanung urbaner Areale und Stadtentwicklung eine Änderung der Symmetriebedingungen der beleuchteten Gebiete auftritt. Yamaguchi et al. führten dabei analog zu den Untersuchungen von Krogager einen zusätzlichen Helixmechanismus als vierte Komponente der mittleren Kovarianzmatrix ein, da Messdaten mit hohem Anteil künstlicher Strukturen eine Korrelation zwischen ko- und kreuzpolaren Kanälen  $\langle S_{HH} S_{HV}^* \rangle \neq 0$  aufwiesen [51]. Weiterhin wurde der Mechanismus der Volumenstreuung leicht verändert, indem die Annahme der gleichverteilten Orientierung kleiner Dipole durch einen flexibleren Ansatz zur Einschätzung von Ungleichheiten der kopolaren Leistungen  $\langle |S_{HH}|^2 \rangle$  und  $\langle |S_{VV}|^2 \rangle$  ersetzt wurde. Insgesamt bietet die 4-Komponenten-Zerlegung von Yamaguchi 5 unabhängige Gleichungen mit 6 Parametern, wobei analog zur 3-Komponenten-Zerlegung von Freeman und Durden ein stufenweiser Ansatz zur Auflösung aller Parameter gewählt wurde.

#### Eigenwert-Eigenvektor-Zerlegung der Kohärenzmatrix

Die hermiteschen Eigenschaften von Kovarianz- und Kohärenzmatrix erlauben eine Zerlegung in eine Summe von Matrizen mit Rang 1. Cloude führte auf dieser

Grundlage eine Zerlegung der Kohärenzmatrix  $\mathbf{T}$  ein, welche eine physikalische Interpretation ihrer reellen Eigenwerte analog zur Pauli-Zerlegung bietet [52]. Gemäß Gleichung 2.41 kann  $\mathbf{T}$  in eine unitäre Matrix  $\mathbf{U}$  und eine Diagonalmatrix  $\mathbf{\Sigma}$  zerlegt werden, wobei  $\lambda_i$  die Eigenwerte und  $\mathbf{u}_i$  die zugehörigen Eigenvektoren von  $\mathbf{T}$  bezeichnet.

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{U}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \mathbf{u}_2 & \mathbf{u}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1^H \\ \mathbf{u}_2^H \\ \mathbf{u}_3^H \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Setzt sich  $\mathbf{T}$  lediglich aus der Rückstreuung eines einzelnen Mechanismus zusammen, folgt daraus das Vorhandensein eines einzelnen Eigenwerts ungleich 0. Im allgemeinen Fall lassen sich 3 (monostatisch) bzw. 4 (bistatisch) Mechanismen anhand der Eigenvektoren identifizieren, wobei die zugehörigen Eigenwerte die Gewichtung ihrer Anteile zur Gesamtbeobachtung definieren. Die *Cloude-Zerlegung* nimmt außerdem eine Parametrierung des stärksten Eigenvektors gemäß Gleichung 2.42 vor, wobei  $\alpha$  eine Einordnung des Mechanismus zu ungeradzahligem ( $\alpha < 45^\circ$ ) oder geradzahligem Reflexion ( $\alpha > 45^\circ$ ) bzw. zum Dipolmechanismus ( $\alpha \approx 45^\circ$ ) ermöglicht.

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{max} = e^{j\phi_i} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & \sin(\alpha_i)\cos(\beta_i)e^{j\delta_i} & \sin(\alpha_i)\cos(\beta_i)e^{j\gamma_i} \end{bmatrix}^T \quad (2.42)$$

Zur Beschreibung der relativen Verteilung des Eigenwertespektrums von  $\mathbf{T}$  lässt sich das Verhältnis der Eigenwerte als Pseudo-Wahrscheinlichkeiten  $P_i$  des Auftretens eines bestimmten Rückstreumechanismus gemäß Gleichung 2.43 ausdrücken [53].

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^N \lambda_k} \quad (2.43)$$

Zur Interpretation der Einzelwahrscheinlichkeiten wurde zunächst die polarimetrische Entropie  $H_{HA\bar{\alpha}}$  nach Gleichung 2.44 eingeführt [54].

$$H_{HA\bar{\alpha}} = - \sum_{i=1}^N P_i \log_N(P_i) \quad (2.44)$$

Mit  $0 < H_{HA\bar{\alpha}} < 1$  kann somit die Anzahl vorhandener Mechanismen gewichtet nach ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. Dominanz im Gesamtvorgang untersucht werden.  $H_{HA\bar{\alpha}} = 0$  bezeichnet dabei das Vorhandensein eines einzelnen dominanten Mechanismus und somit eine einfache Rückstreuung. Mit steigender Entropie nimmt die Dominanz des Einzelmechanismus ab und die Rückstreuung wird zufälliger.  $H_{HA\bar{\alpha}} = 1$  bezeichnet folglich eine mittlere Kohärenzmatrix mit identischen

Eigenwerten, wobei wie bereits diskutiert der Bereich und Umfang der Mittelung entscheidend ist. Wird aus deutlichen verschiedenen Aspektwinkeln zum Ziel eine Kohärenzmatrix mit geringer Entropie extrahiert, kann eine Aussage über die hohe räumliche Stabilität eines beobachteten Mechanismus getroffen werden. Bei eng benachbarten Messpositionen muss a-priori von einer hohen Korrelation der Messergebnisse und damit einer geringen Entropie ausgegangen werden, wodurch eine Analyse auch unter Betrachtung der Messumgebung und des Ablaufs der Messung erfolgen muss.

Cloude und Pottier veröffentlichen 1997 die *Entropie-Anisotropie-Alpha-Zerlegung* ( $HA\bar{\alpha}$ ) als Interpretation der Eigenwerte und Eigenvektoren der Kohärenzmatrix als Parameterraum zur unüberwachten Klassifizierung polarimetrischer Radar-Bilder [55]. Der in Gleichung 2.42 definierte  $\alpha$ -Winkel wurde entsprechend nicht ausschließlich für den maximalen Eigenvektor sondern als gewichteter Mittelwert aller vorhandenen Eigenvektoren gemäß Gleichung 2.45 formuliert.

$$\bar{\alpha}_{HA\bar{\alpha}} = \sum_{i=1}^N P_i \alpha_i \quad (2.45)$$

Im Fall hoher Entropie bietet zudem die relative Gewichtung der kleineren Eigenwerte  $\lambda_2$  und  $\lambda_3$  bei Sortierung gemäß  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$  eine zusätzliche Interpretation der Vorgänge in Form der polarimetrischen Anisotropie  $A_{HA\bar{\alpha}}$  gemäß Gleichung 2.46.

$$A_{HA\bar{\alpha}} = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (2.46)$$

Neben der Transformation polarimetrischer Radar-Daten, entwickelten Cloude und Pottier zusätzliche ein 9-Zonen-Modell, welches Parameterwerte der  $H\bar{\alpha}$ -Ebene zu typischen Rückstreubedingungen der Satellitenfernerkundung in Verbindung setzt. Die Abgrenzungen zwischen den einzelnen Zonen wurden dabei aufgrund der Verteilung synthetisierter Kohärenzmatrizen aus dem eingeführten statistischen Datenmodell abgeleitet. Auf Grundlage der  $H\bar{\alpha}$ -Ebene lassen sich folglich Radar-Messungen in Kategorien klassifizieren, welche von quasi-deterministischer Rückstreuung (bspw. von Erdboden oder Doppelreflexionen) bis hin zu vollkommen zufälliger Signaturen (bspw. von starker Vegetation) reicht.

#### 2.3.3. Zusammenfassung

Sämtliche Information polarimetrischer Objektrückstreuung wird als Momentaufnahme in Form einer  $2 \times 2$  Streumatrix zur Verfügung gestellt, welche je nach mono- bzw. bistatischer Geometrie lediglich eine begrenzte Anzahl an Freiheitsgraden aufweist. Durch Basiswechsel oder Transformation in andere Formen wie

die Kovarianz- bzw. Kohärenzmatrix erfolgt lediglich eine Änderung der Darstellung womit folglich der Informationsgehalt identisch bleibt. Der komplexe Vorgang der Streuung elektromagnetischer Wellen wird mittels polarimetrischer Zerlegungsverfahren mit idealisierten Modellvorstellungen verglichen und soll eine Interpretation einer gemessenen Streumatrix unter Kenntnis bestimmter Randbedingungen ermöglichen. Von herausragender Bedeutung ist dabei die zu erwartende Anzahl anzutreffender Mechanismen und somit die Vorabkenntnis über die Komplexität der Rückstreuung. Huynen beschrieb dabei kohärente Rückstreuung mit einem „pure single target“, welches sich durch die Anwesenheit eines einzelnen Mechanismus auszeichnet. Die Idee eines verteilten oder komplexen Ziels, welches analog zu inkohärenter Rückstreuung behandelt werden kann, bezeichnete er als zusätzlichen stochastischen Term in Form eines „N-target“. Mit zunehmender Komplexität der Rückstreuung und damit Anzahl unterschiedlicher Mechanismen können umfangreichere Verfahren wie die „Cameron“- oder „Huynen-Euler“-Zerlegung eher physikalische Interpretation bieten als einfachere Verfahren wie „Pauli“ oder „Krogager“-Zerlegung, welche die Streumatrix in einen geringer dimensionalen Parameterraum abbilden. Eine Gemeinsamkeit aller kohärenter Zerlegungen ist die fehlende Möglichkeit eine Überlagerung mehrerer kanonischer Objekte innerhalb einer Entfernungszelle aufzulösen. Weiterhin beruhen die überwiegende Mehrheit der Verfahren auf orthogonalen Gruppen, welche durch Auswertung eines Eigenwertproblems identifiziert werden sollen. Im Fall nicht-orthogonaler Rückstreuung oder dem Vorhandensein nicht-kanonischer zusammengesetzter Mechanismen, kommt die Leistungsfähigkeit der eingeführten kohärenten Zerlegungsverfahren an ihre Grenzen.

Bereits in den Arbeiten von Huynen existiert daher der Gedanke des mittleren Rückstreumechanismus, um Streumatrizen hoher Varianz interpretieren zu können. Für inkohärente Zerlegungsverfahren spielt die Art der Mittelung und die vorhandene Varianz über eine bestimmte Anzahl an Beobachtungen eine zentrale Rolle in der Bewertung der Anzahl verschiedener Mechanismen. Dabei gliedern sich die Verfahren in Eigenwert-Eigenvektor-Zerlegungen und modellbasierte Zerlegungen der Kovarianz- bzw. Kohärenzmatrix. Eigenwerte und Eigenvektoren spiegeln dabei die Verteilung und die Form sich überlagernder Mechanismen wieder, und bieten damit physikalische Interpretation der mittleren Rückstreuung. Im Gegensatz dazu passen modellbasierte Verfahren einen Parametersatz spezifischer Mechanismen an Messdaten an und benötigen somit einen gewissen Grad an vorhandenen Informationen an die zu erwartende Rückstreuung.

Die in diesem Abschnitt eingeführten Verfahren zeigen lediglich einen Teil der verschiedenen Zerlegungstechniken und bieten vielmehr eine Veranschaulichung der unterschiedlichen Herangehensweisen an die physikalische Interpretation einer gemessenen Streumatrix. Diese wurde bisher als abstrakte polarimetrische Signatur der Rückstreuung eines Objekts behandelt, wobei in der überwiegenden Mehrheit

der Publikationen polarimetrische Pixel des Bildbereichs als Ursprung der Information dienen. Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass die dominierenden SAR-Bildgebungsverfahren der modernen Fernerkundung auf spezifischen Randbedingungen und Vorgehensweisen beruhen, welche nicht direkt auf die in dieser Arbeit behandelten Szenarien der UWB-Radar-Sensorik im Nahbereich übertragbar sind. Aus diesem Grund erfolgt im nächsten Kapitel eine kurze Gegenüberstellung der Besonderheiten breitbandiger Nahbereichssensorik und den Verfahren der Fernerkundung, wobei die Bildgebung stationärer Umgebung mittels bewegter breitbandiger Radar-Sensoren im Vordergrund steht.



# 3. Breitbandige Radar-Bildgebung im Nahbereich

## Einordnung

Radar-Polarimetrie und -Bildgebung behandeln jeweils inverse Probleme, welche eng miteinander verbunden sind. Definiert man die Abbildung der Elemente  $\mathbf{x}$  einer Definitionsmenge (Ursachen, Parameter) auf Elemente  $\mathbf{y}$  einer Zielmenge (Wirkung, Messdaten) gemäß Gleichung 3.1, so ergibt sich ein direktes Problem aus der Bestimmung von  $\mathbf{y}$  unter der Kenntnis von  $f$  und  $\mathbf{x}$  über die Beziehung  $f(\mathbf{x}) = \mathbf{y}$ . Da in vielen Fragestellungen lediglich die Wirkung beobachtet werden kann, jedoch die zugrundeliegende Ursache erschlossen werden soll, müssen für diese Fälle geeignete Modelle zur näherungsweisen Invertierung der Gesetzmäßigkeiten des direkten Problems gefunden werden.

$$f : \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{Y} \tag{3.1}$$

Bezogen auf die eingeführten Zerlegungsmethoden der Radar-Polarimetrie, stellen die zugrundeliegenden Interaktionen der einfallenden Welle mit dem Objekt die Ursache für die Beobachtung einer bestimmten Streumatrix dar. Diese werden mithilfe der im vorangegangenen Kapitel diskutierten unterschiedlichen Streumechanismen in vereinfachter Weise modelliert, um eine Änderung des Polarisationszustands zu erfassen.

Verfahren der Radar-Bildgebung hingegen befassen mit den räumlich-zeitlichen Zusammenhängen der Wellenausbreitung wie sie in Unterabschnitt 2.1.1 erläutert wurden. Die Zielmenge besteht dabei aus Radar-Messdaten, welche mit beschreibenden Meta-Informationen zur Bildgebung genutzt werden. Als Definitionsmenge gelten die Interaktionsobjekte des Raumes, welche mithilfe eines Bildgebungsverfahrens lokalisiert werden. Kernpunkt der Transformation in den Ortsbereich besteht in der Invertierung zentraler Aspekte der Wellenausbreitung wie Streuung, Beugung, Brechung, Kompression oder Expansion des Wellenfeldes, wodurch die verschiedenen Verfahren unterschiedliche Messsensorik und Algorithmik erforderlich machen.

---

Dabei spielen die Randbedingungen der Messumgebung und des Messsystems eine entscheidende Rolle für die zu berücksichtigenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Zur Definition grundlegender Begriffe der Bildgebung können Eigenschaften der Umgebung zur Einordnung herangezogen werden:

- **Art der Systemapertur**

Bildgebende Radarsysteme mit realer Apertur (real aperture radar, RAR) nutzen die schmale Hauptkeule der Charakteristik der elektrisch großen Sende-/Empfangsantenne um eine hohe Auflösung quer zur Ausbreitungsrichtung zu erzeugen. Ein großer Raumbereich wird dabei durch Schwenken der Antenne abgedeckt, wobei zeitgleich nur eine kleine Fläche beleuchtet wird.

Radarsysteme mit synthetischer Apertur (synthetic aperture radar, SAR) verwenden hingegen elektrisch kleinere Antennen mit breiterer Charakteristik. Die Ausbreitungsrichtung befindet sich ebenfalls quer zur Bewegungsrichtung des Systems, wobei ein Ziel über eine gewisse Messzeit hinweg beleuchtet wird. Durch geeignete Signalverarbeitung wird die Bewegung des Systems oder des Ziels genutzt, um Signalanteile des Zielechos über die gesamte Beleuchtungszeit kohärent summieren zu können und eine hohe Auflösung in Bewegungsrichtung zu erreichen. SAR bezeichnet dabei die Bewegung des Radars, wohingegen invers auch eine Bewegung des Ziels zur Bildgebung genutzt werden kann (ISAR). Reale Anwendungen zeichnen sich häufig durch eine Kombination realer und synthetischer Aperturen aus. So kommen bspw. bei der Abbildung von Radar-Rückstreuquerschnitten (radar cross section, RCS) kommen ISAR-Anordnungen zur Anwendung, wobei das Testobjekt von einer Antenne schmalen Richtcharakteristik beleuchtet wird.

- **Zur Verfügung stehende Bandbreite**

Die Signalbandbreite steht im direkten Zusammenhang mit der theoretisch erreichbaren Auflösung in Entfernungsrichtung. Im Fall schmalbandiger Systeme sind die Entfernungszellen der Messdaten groß genug, um die Rückstreukomponenten mehrerer beleuchteter Ziele zu enthalten. Durch Interferenz dieser Komponenten können die einzelnen Ziele nicht mehr in Entfernungsrichtung der Messdaten (Zeitbereich) voneinander getrennt werden, wodurch eine Transformation der Daten in den Ortsbereich durchgeführt werden muss, um eine Zielseparierung vorzunehmen.

Breitbandige Systeme ermöglichen eine Zielanalyse im Zeitbereich, da sich deren Rückstreukomponenten über mehrere Entfernungszellen verteilen und bereits im Zeitbereich separiert werden können. Somit können Erkenntnisse über die Zielstatistik vor der Transformation in den Ortsbereich gewonnen werden.



- **Messumgebung**

Die zu erwartende Qualität der Bildgebungsresultate hängt maßgeblich vom Grad der Kontrolle und der Genauigkeit der Beschreibung der Messumgebung ab. In Laborumgebungen können zahlreiche Randbedingungen wie Position und Orientierung der Sensoren oder des Ziels präzise gesteuert und parasitäre Effekte der Umgebung unterdrückt werden (Absorbermaterial, genaue Systemkalibrierung). In anwendungsnahen Situationen (bspw. autonome Lagerroboter, KFZ-Radar) sind diverse Randbedingungen nur eingeschränkt kontrollierbar oder sogar unbekannt. Weiterhin spielt der Grad an a priori Informationen einen maßgeblichen Einfluss auf die möglichen Signalverarbeitungsmethoden. Ohne jegliche Kenntnis über kanonische Objekte oder besondere Zielstellungen ist eine blinde Transformation der Messdaten in den Bildbereich erforderlich. Dabei können lediglich grundlegende physikalische Gesetzmäßigkeiten und vereinfachte Objektmodelle umgesetzt werden. Dahingegen können modellbasierte Verfahren spezifische Modelle von Objekten und Ausbreitungsphänomenen in den Transformationsvorgang einfließen lassen. Entsprechen die Messdaten dem Datenmodell können die Resultate der Bildgebung verbessert werden.

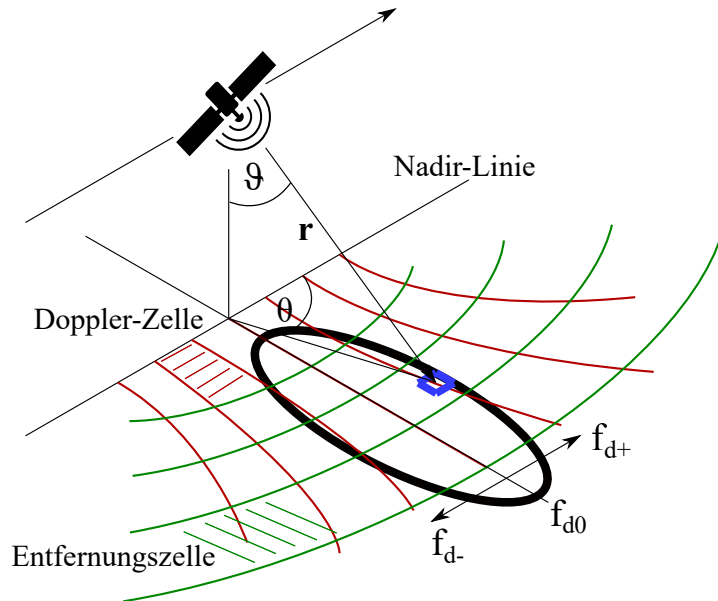
## 3.1. Bildgebende Systeme mit synthetischer Apertur

Bildgebende Technologien welche die Bewegung des Sensors ausnutzen, entstanden zunächst im Rahmen militärischer und ziviler Forschung in den 1940er und 1950er Jahren in den Bereichen der luftgestützten Fernaufklärung und der Seismik als Teil der angewandten Geophysik. Besonders in Fragen der Implementierung von effizienten Signalverarbeitungsmethoden beeinflussten sich beide Bereiche gegenseitig. Für die Radar-Polarimetrie spielt die Fernerkundung eine maßgebliche Rolle in der Entwicklung der vorgestellten Zerlegungsverfahren, wobei das Verständnis der besonderen Fernerkundungsgeometrie und der Unterschiede zur UWB-Radar-Sensorik von Interesse für die Übertragung der Methoden in den Nahbereich sind.

### 3.1.1. Raum- und luftgestützte Radar-Fernerkundung

1954 patentierte *Carl Wiley* (Goodyear Aerospace) das erste SAR-Verfahren, welches die bis heute typischen Systemcharakteristika und Signalverarbeitungsschritte enthält [56]. Zur eindeutigen Zuordnung eines Ortes zu einem empfangenen gepulsten Trägersignal, wird dessen Sende-Empfangs-Verzögerungszeit und Dopplerverschiebung ausgewertet. Ein Radar auf einer luftgestützten Plattform beleuchtet dabei senkrecht zur Flugrichtung ein wie in Abbildung 3.1 dargestelltes Gebiet, welches sich in genügend großem Abstand zur Projektion der Flugbahn auf der Ober-

fläche (Nadirlinie) befindet. Durch diese Geometrie eines Seitensicht-Radars wird

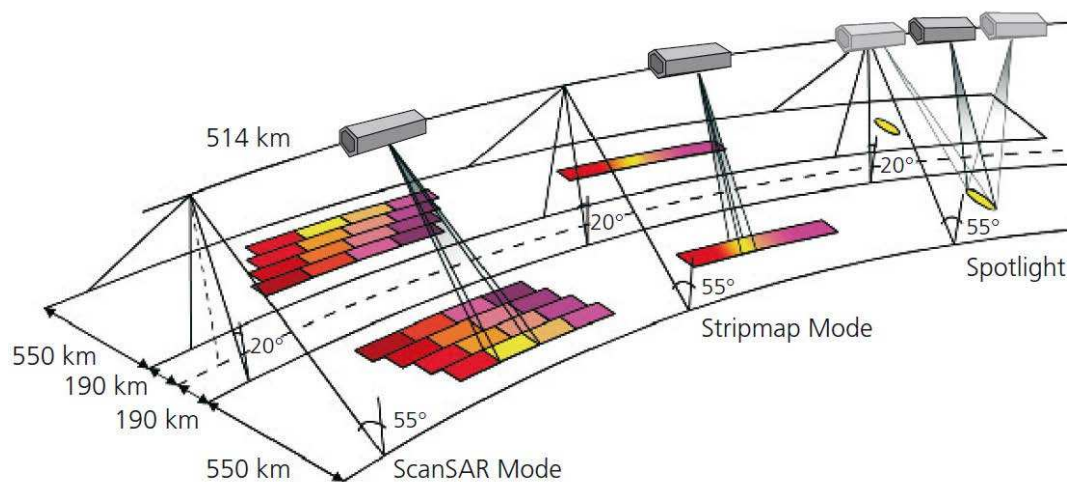


**Abbildung 3.1.:** Klassische SAR-Bildgebung mit luft- oder raumgestützter Plattform: Kreise gleicher monostatischer Zielentfernung (grün) und Hyperbeln gleicher Dopplerverschiebung (rot) am Boden bilden die Grundlage zur Transformation der Radardaten in den Bildbereich (umrahmt).

die Mehrdeutigkeit zwischen den Ebenen links und rechts der Nadirlinie verhindert, da sich jeweils symmetrisch auf beiden Seiten Punkte mit gleicher Verzögerung und Dopplerverschiebung befinden. Weiterhin wird angenommen, dass hohe Anteile optischer Rückstreuung vom Gebiet nahe der Nadirlinie zu einer ungünstigen Signaldynamik führen. In der Seitensicht-Geometrie wird folglich der überwiegende Teil der Energie vom Sensor weg gestreut, wobei dieser Effekt besonders bei elektrisch glatten Gebieten wie ruhigen Wasseroberflächen deutlich wird. Während der Bewegung der Plattform werden Ziele am Erdboden je nach Bewegung und Öffnungswinkel des Sensors für eine gewisse Zeit beleuchtet und bilden sich mit Doppler-Verschiebungen zwischen  $f_{d+}$  und  $f_{d-}$  im bipolaren Doppler-Spektrum und Verzögerungszeiten  $\tau$  in die aufgezeichneten rückgestreuten Signale ab. SAR-Bildgebungsverfahren nehmen eine Zuordnung (Mapping) des Doppler-Spektrums und der Entfernungszellen in den Bildbereich mit  $(\tau, f_d) \rightarrow (r, \theta)$  vor.

Seit den 1970er Jahren entstanden zahlreiche digitale Algorithmen zur Bildgebung von SAR Daten, welche grundsätzlich eine Kompression des Sendesignals in Entfernungsrichtung (engl.: range compression) und in Bewegungsrichtung (engl.: azimuth compression) vornehmen. Da die Einzelbilder der separaten Beobachtungen kohärent überlagert werden, entstehen Interpolationsprobleme bei der Anpas-

sung der Positionen der Pixel im Bildbereich und der Datenpunkte der Messdaten, welche die Methoden unterschiedlich lösen. Eine Übersicht der einzelnen Verfahren wird in [57, 58] gegeben, wobei die range compression auch bei stationären Bildgebungsverfahren zur Anwendung kommt und im nächsten Abschnitt näher ausgeführt wird. In modernen Satellitensystemen besteht, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, zudem eine adaptive Steuerung der Antennencharakteristik mit verschiedenen Beleuchtungsmodi, welche im Austausch zwischen räumlicher Abdeckung und Auflösung des Bildes eine hohe Flexibilität ermöglichen. Nimmt man gemäß [59]



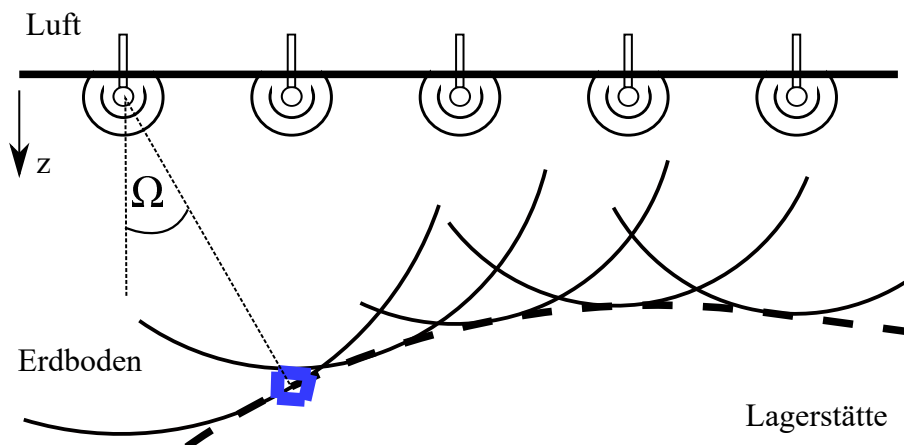
**Abbildung 3.2.:** Bildgebungskonfigurationen des TerraSAR-X Satelliten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Quelle: DLR (CC-BY 3.0)

für die Auslegung des Radar-Sensors des DLR-Satelliten TerraSAR-X zusätzlich zur Geometrie eine Signalbandbreite von 300 MHz und einen 3-dB-Öffnungswinkel der Antenne von  $0,3^\circ$  in Bewegungsrichtung und  $2,3^\circ$  in Entfernungsrichtung an, lässt sich die reale Apertur nach Entfernungskompression mit einer Länge von 3,4 km bis 5,6 km und einer Breite von ca. 40 km bei einer theoretischen Auflösung in Entfernungsrichtung zwischen 1,5 m und 0,6 m abschätzen. Zur Trennung lokaler Rückstreumechanismen ist es daher unumgänglich eine Kompression der Einzelbeobachtungen in Bewegungsrichtung vorzunehmen, um eine Streumatrix mit geringer Anzahl überlagerter Komponenten zu erhalten, welche letztlich im Bildbereich vorliegt. Das genannte Beispiel bietet abhängig von der verwendeten Bildgebungskonfiguration Pixelgrößen von 40 m bis 25 cm nach erfolgter Signalkompression in Bewegungsrichtung [60]. Charakteristisch für den erzeugten Bildbereich der Fernerkundung ist eine klare Trennung zwischen der Auflösung in Entfernungsrich-

tung, welche maßgeblich durch die Signalbandbreite des Systems bestimmt wird, und in Bewegungsrichtung, welche maßgeblich durch die Winkelinformation des Dopplerspektrums während der Beleuchtung entsteht. Durch die spezielle Geometrie ändert sich der Beleuchtungswinkel zum Ziel in vernachlässigbarem Umfang, wodurch lokal angeregte Rückstreumechanismen mit hoher Wahrscheinlichkeit während der gesamten Beleuchtungszeit unverändert vorliegen. Eine Ausnahme entsteht bei Spotlight-Beleuchtung eines Zielgebiets, bei dem die Antennencharakteristik mit der Bewegung der Plattform nachgeführt wird und sowohl Beleuchtungszeit als auch Aspektwinkel zum Ziel einen größeren Bereich einnehmen.

### 3.1.2. Seismische Signalverarbeitung

Parallel zur Radar-Fernerkundung bestand im Bereich der Exploration von Bodenschätzen wie Erdöllagerstätten ein Interesse an bildgebenden Verfahren in der akustischen Signalverarbeitung der angewandten Geophysik. Abbildung 3.3 zeigt eine typische geometrische Anordnung mit Sensoren, welche an der Oberfläche verteilt, Echos ausgesendeter Anregungssignale aufzeichnen. An Grenzschichten un-



**Abbildung 3.3.:** Bildgebungsszenario der seismischen Exploration: Entlang der Erdoberfläche erfassen akustische Sende-Empfangsknoten gestreute Signale, um Volumen unterschiedlicher Ausbreitungsbedingungen zu identifizieren.

terschiedlicher Ausbreitungsbedingungen treten Streuungen auf, welche mithilfe der gemessenen Verzögerungszeiten identifiziert werden sollen. Betrachtet man das inverse Problem und die Geometrie der Umgebung bestehen zahlreiche Gemeinsamkeiten mit der bildgebenden UWB-Radar-Sensorik: Es handelt sich in beiden Szenarien um näherungsweise zeitinvariante Systeme, wodurch eine Doppler-Verarbeitung entfällt. Das Verhältnis zwischen Länge der synthetischen Apertur der

Sensoren und der Entfernung zu Zielen ist um Größenordnungen kleiner als bei typischen Geometrien der Fernerkundung. Dadurch werden Objekte aus einem größeren Bereich unterschiedlicher Aspektwinkel beleuchtet, weshalb eine eindeutige Trennung zwischen Entfernungs- und Bewegungsrichtung entfällt<sup>1</sup>. Durch den Schritt der Kompression der Signalform in Entfernungsrichtung und anschließender kohärenter Überlagerung der Einzelbilder trägt die Bandbreite abhängig vom Aspektwinkel  $\Omega$  zur Auflösung in beiden Richtungen bei.

Als Pionierarbeiten der 1950er Jahre zählen die grafischen Konstruktionsmethoden von *Hagedoorn* (Royal Dutch Shell), welche zur Identifikation konvexer bzw. konkaver Oberflächen genutzt wurden [61]. Als Umsetzung des Huygen'schen Prinzips entwickelte Hagedoorn Verfahren, welche eine Invertierung der Ausbreitung einer Wellenfront durch Projektion gemessener Verzögerungszeiten in z-Richtung gewährleisteten. Als Grundlage diente die skalare Wellengleichung gemäß Gleichung 3.2, wobei  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium und  $q$  die im Medium vorhandenen Quellen definiert. Durch zur Verfügung stehende Rechenteknik wurden die Methoden in den 1970er Jahren automatisiert und weitere numerische Lösungsverfahren partieller Differentialgleichungen auf die Probleme der Seismik angewendet. Besondere Herausforderungen stellt dabei die Inhomogenität des Mediums und damit verbundene Abhängigkeiten der Ausbreitungsgeschwindigkeit dar.

$$\nabla^2 A - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = q(r, t) \quad (3.2)$$

Erste digitale seismische Bildgebungsverfahren wurden an der Stanford University von *Claerbout* auf Grundlage der Finite-Differenzen-Methode entwickelt, wobei eine numerische Lösung der Wellengleichung im Zeitbereich genutzt wird [62, 63]. Das zugrundeliegende Ausbreitungsmodell eines explodierenden Reflektors (exploding reflector model), bezieht sich dabei auf ein angeregtes Volumenelement, welches als virtueller Emitter einer Welle mit halber Ausbreitungsgeschwindigkeit wirkt. Das Modell kann mit Green'schen Funktionen beschrieben werden, wobei im Fall dicht angeordneter Sensoren eine einfache Kugelwelle gemäß Gleichung 3.3 angenommen werden kann. Dieses Vorgehen entspricht dem Huygen'schen Prinzip der Überlagerung von Elementarwellen, welche an den Oberflächenelementen einer Grenzschicht entstehen und in gewisser Entfernung eine Wellenfront bilden.

$$G(r, t) = \frac{\delta(t - R/c)}{R} \quad (3.3)$$

Das von Claerbout entwickelte Verfahren ist vergleichbar mit dem in Unterabschnitt 3.2.1 definierten Methode der einfachen Integration gleicher Verzögerungszeiten. Für den Fall äquidistanter Sensoren wurden zudem von

---

<sup>1</sup>in der Seismik werden stattdessen häufig die Begriffe Tiefen- und Querrichtung verwendet

*Stolt* (Conoco) und *Gazdag* (IBM), Implementierungen im Frequenzbereich unter Nutzung der schnellen Fouriertransformation eingeführt, welche für homogene und inhomogene Medien Anwendung finden [64, 65].

Neben der Finite-Differenzen-Methode bietet eine Beschreibung des inversen Problems als Randwertproblem eine weitere Möglichkeit der Lösung der inhomogenen Wellengleichung auf Grundlage der Überführung des Integrals der Volumenelemente in ein Integral der einschließenden Oberfläche. *Schneider* (Texas Instruments) entwickelte auf Grundlage der Kichhoff-Helmholtz-Gleichung gemäß Gleichung 3.4 einen Bildgebungsansatz, welcher später als Kirchhoff-Migration bezeichnet wurde und in Unterabschnitt 3.2.2 zur UWB-Bildgebung genutzt wird [66].

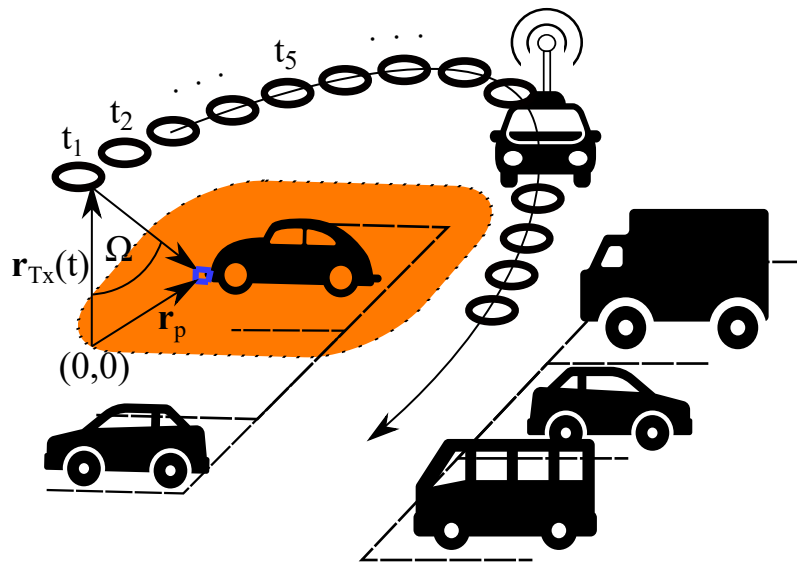
$$A(r, t) = -\frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \left( \frac{\partial A(r_0, t_0)}{\partial n} G(r, t) - A(r_0, t_0) \frac{\partial G(r, t)}{\partial n} \right) dS_0 \quad (3.4)$$

Damit kann eine Feldgröße  $A$  an einem Ort  $r$  beschrieben werden, wenn Messungen der Feldgröße auf einer Oberfläche  $S_0$  vorgenommen wurden und ein Ausbreitungsmodell anhand einer Green'schen Funktion vorliegt. Der Energietransport bei Kugelwellenausbreitung kann bei elektromagnetischen Wellen analog zur akustischen Signalverarbeitung modelliert werden. Für das inverse Problem der Bildgebung stationärer Szenarien existieren daher große Ähnlichkeiten zur Radar-Bildgebung, welche insbesondere im Bereich von Boden-Radar-Anwendungen zur Nutzung ursprünglich seismischer Algorithmen führten.

### 3.1.3. UWB-Radar-Sensorik

Erste Boden-Radar-Systeme wurden zeitgleich mit konventionellen Radar-Systemen patentiert, um größere vergrabene Objekte wie Rohre oder metallische Leitungen zu detektieren [67–69]. In den 1980er und 1990er Jahren bestand ein großes Interesse an Funktechnologien hoher Bandbreite für Kommunikations- und Aufklärungsaufgaben, wobei zeitgleich die Integration kompletter Transceiver-Module durch Entwicklungen in der Mikroelektronik zu kompakten und tragbaren Systemen führten [70]. Für zahlreiche Szenarien des zerstörungsfreien Prüfens und der angewandten Geophysik wurden Radar-Systeme großer Bandbreite entwickelt, welche besonders durch die Verwendung tiefer Frequenzen im Sendespektrum eine sinnvolle Ergänzung zu akustischen Methoden darstellen, da die materialdurchdringenden Eigenschaften elektromagnetischer Wellen zur Informationsextraktion genutzt wurden. Neben der Inspektion der Substanz von Bauwerken bieten Boden-Radar-Anwendungen bis heute zahlreiche zivile und militärische Einsatzgebiete in Archäologie, Tiefbau oder der Detektion von Sprengsätzen u.v.m. Ein Überblick der verschiedenen Anwendungs- und Systemkonzepte wurde in zahlreichen Veröffentlichungen gegeben [71–79].

Aufgrund der im Jahr 2002 erstmaligen Regulierung eines breiten Frequenzbandes von 3,1 GHz bis 10,6 GHz durch US-amerikanische Behörden, beschleunigte sich das Interesse an breitbandigen Funksystemen, wodurch sich das Forschungsspektrum weit über die Gebiete des zerstörungsfreien Prüfens ausdehnte [80]. Durch Leistungsbeschränkungen wurde die Koexistenz der Systeme mit bereits bestehenden Nutzern gewährleistet und gleichzeitig die Reichweite der Sensorik auf den Nahbereich begrenzt. Zur Vertiefung der Forschungsbestrebungen der UWB-Technologie wurden weltweite zahlreiche Forschungsprojekte initiiert, wie das durch die Europäischen Union von 2004 bis 2008 geförderte Projekt *Pervasive Ultra-wideband Low Spectral Energy Radio Systems (Pulsers)*. Einige wesentliche Grundlagen dieser Arbeit stellen die Erkenntnisse des von 2006 bis 2012 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG geförderten Schwerpunktprogramms *Ultrabreitband-Funktechniken für Kommunikation, Lokalisierung und Sensorik (UKo-LoS)* dar. In diesem Verbund zahlreicher Forschungsvorhaben, welche auszugsweise in Abschnitt 3.3 detaillierter ausgeführt werden, wurden u.a. Fragestellungen der Kartierung von Umgebungen sowie Bildgebung und Lokalisierung von Objekten für Anwendungen der Robotik ausführlich thematisiert [81].



**Abbildung 3.4.:** Bildgebungsszenario breitbandiger Radar-Sensorik im Nahbereich: Ein bewegter Sensor erfasst an Zeitpunkten  $t_1$  bis  $t_N$  Impulsantworten, welche unter Nutzung der gebildeten synthetischen Apertur eine Abbildung der Umgebung ermöglichen. Aufgrund der geometrischen Konstellation beinhalten die Radar-Daten zahlreiche Rückstreuikomponenten verschiedener Objekte und Mehrwegepfade. Außerdem nimmt der räumliche Aspektwinkel zum Pixel eventuell Einfluss auf den beobachteten Rückstreumechanismus.

Damit lässt sich das einleitende Szenario bildgebender Radar-Nahbereichserkundung dieser Arbeit konkretisieren. Abbildung 3.4 definiert dabei die grundlegenden Messgrößen und geometrischen Bedingungen eines Szenarios, indem ein bewegter Sensor die Abbildung einer Umgebung zur Lokalisierung von vorhandenen Objekten gewährleistet. Bewegt sich ein omnidirektionaler Sensor mit einer Sendeanenne an Position  $\mathbf{r}_{Tx} = [x_{Tx} \ y_{Tx}]^T$  und einer Empfangsantenne an Position  $\mathbf{r}_{Rx} = [x_{Rx} \ y_{Rx}]^T$  auf einem beliebigen Pfad durch eine Umgebung, werden durch die Erfassung der Radar-Signale Messdaten  $M(\mathbf{r}, t) = [m_1(t) \cdots m_n(t)]$  aufgenommen. In diskreter Schreibweise beziehen sich die einzelnen Impulsantworten  $m_1(t)$  bis  $m_n(t)$  auf Momentaufnahmen der Rückstreuung der Umgebung an  $t_1$  bis  $t_n$  Zeitpunkten.  $\mathbf{r}$  definiert dabei die Position der Systemkomponenten, wohingegen  $t$  den zeitlichen Verlauf des Signals am Empfänger beschreibt. Die Gesamtheit aller Messdaten  $M(\mathbf{r}, t)$  wird auch als Radargramm bezeichnet.

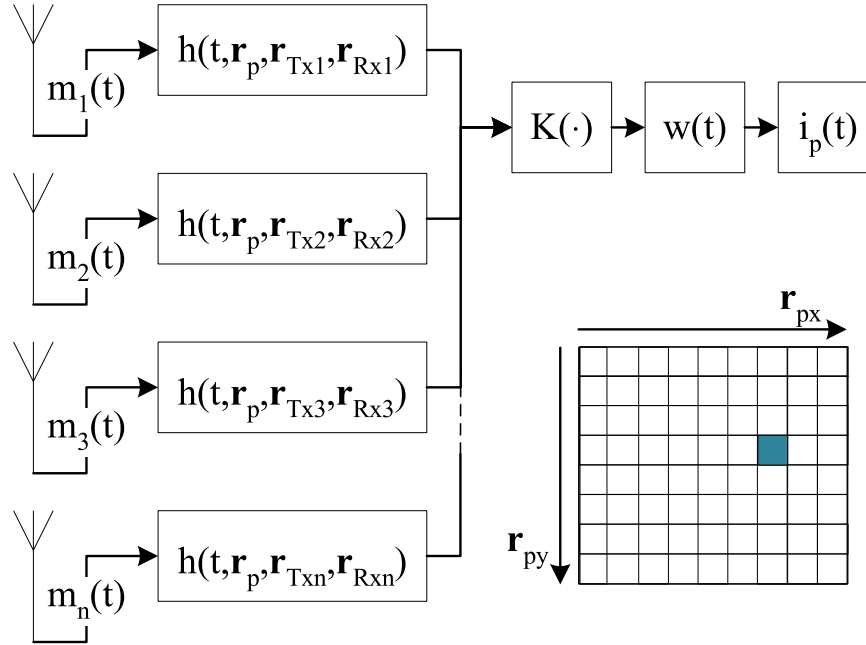
Im Unterschied zur luftgestützten Fernerkundung und seismischen Signalverarbeitung zeichnet sich das Szenario der UWB-Radar-Sensorik durch eine synthetische Systemapertur aus, welche durch Messpositionen auf einem Pfad beliebiger Form und Abständen gebildet wird. Folglich entfällt die Zuordnung des inversen Problems zu einem einzelnen Halbraum um den Sensor, wodurch der Aspektwinkel  $\Omega$  zum abzubildenden Pixel  $\mathbf{r}_p$  keine eindeutige Zuordnung einer Richtung im Raum zulässt. Weiterhin zeichnet sich die Messumgebung durch das Vorhandensein vieler beliebig angeordneter Rückstreuobjekte um den Sensor im Sinn einer Ausbreitungsumgebung hohem Anteils an Mehrwegekomponenten aus. Für die Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurden in vorangegangenen Forschungsprojekten verschiedene Bildgebungsansätze vorgestellt, welche im Folgenden thematisiert werden.

## 3.2. Bildgebungsalgorithmen der UWB-Radar-Sensorik

Ziel der Bildgebungsverfahren ist eine Rekonstruktion der beleuchteten Umgebungsbestandteile unter Ausnutzung der durch die Bewegung gebildeten synthetischen Apertur des Systems. Im Fall stationärer Umgebungen besteht dabei kein Unterschied zu einer realen Apertur bei der  $n$  Sensoren zeitgleich Messdaten an verschiedenen Positionen aufnehmen. In diesem Zusammenhang wurden in den Arbeiten von Zhuge *et al.* verschiedene aus der Seismik stammende Bildgebungsalgorithmen in Zeit- und Frequenzbereich diskutiert und ausführlich auf die Unterschiede zur Verwendung in Radar-Anwendungen angepasst [82–84]. Orientiert sich die algorithmische Umsetzung an Details unterschiedlicher Randbedingungen des Szenarios wie der äquidistanten Anordnung der Messposition auf einer Geraden



oder Ebene, so existiert dennoch für die Mehrzahl der Bildgebungsverfahren ein grundsätzliches Schema in der Funktionsweise der zugrundeliegenden Signalverarbeitung. Der Bildbereich  $I$  beinhaltet Voxel im dreidimensionalen bzw. Pixel im



**Abbildung 3.5.:** Blockdiagramm bildgebender Signalverarbeitung nach Sachs [85]: Ziel der Bildgebung ist die Kompensation von Ausbreitungsphänomenen, um eine kohärente Integration der Messdaten der einzelnen Sensorpositionen sicherzustellen. Das Integrationssignal  $i_p(t)$  wird bei vollständiger Kompensation maximiert und trägt zur Pixelintensität bei.

zweidimensionalen Raum, deren Position mit  $\mathbf{r}_p = [\mathbf{r}_{px} \ \mathbf{r}_{py}]^T$  definiert ist. Als Vereinfachung wird in dieser Arbeit immer vom zweidimensionalen Fall ausgegangen. Abbildung 3.5 zeigt den grundlegenden Ablauf bildgebender Signalverarbeitung nach (3.5). Die von den Sensoren aufgenommenen Radarsignale unterliegen nach der Abstrahlung von der Sendeantenne verschiedenen Ausbreitungsphänomenen, welche durch die Filterfunktion  $h(t)$  kompensiert werden sollen. Im Fall von bildgebenden Systemen mit realer Apertur unter Verwendung von Antennenarrays wird die Gesamtheit aller Filterfunktionen  $[h(t, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_{Tx1}, \mathbf{r}_{Rx2}) \cdots h(t, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_{Txn}, \mathbf{r}_{Rxn})]$  häufig als Richtungsvektor (engl.: steering vector) bezeichnet. Durch Optimierung dieses Vektors sollen möglichst alle während der Ausbreitung auftretenden Veränderungen des Sendesignals kompensiert werden. Die Ausgangssignale der Filter werden anschließend kombiniert, wobei im einfachsten Fall ein Integrationsglied mit  $K(\cdot) = \sum(\cdot)$  verwendet wird. An dessen Eingang in Abbildung 3.5 liegen kohärente

Signale bei optimaler Wahl der Filterfunktionen vor. Die Wichtungsfunktion  $w(t)$  dient lediglich der zeitlichen Begrenzung des Interaktionssignals  $i_p(t)$  im Sinn einer Fensterfunktion.

$$i_p(t) = w(t) \sum_n m_n(t) * h(t, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_{Tx}, \mathbf{r}_{Rx}) \quad (3.5)$$

Liegen durch die Verwendung orthogonaler Polarisationszustände an Sende- und Empfangsantenne polarimetrische Messdaten vor, ergeben sich entsprechend vier Radargramme bzw. fokussierte Bilder für eine bistatische Sensorkonfiguration. Ein Pixel wird bei Vorhandensein eines Referenzsignals als Kreuzkorrelationskoeffizient nach (3.6) bestimmt. Häufig wird jedoch vereinfacht das Integrationssignal an der Stelle  $t = 0$  nach (3.7) als Pixel angenommen.

$$I(r_{px}, r_{py}) = \sum_t i_p(t) * h_{ref}(t) \quad (3.6)$$

$$I(r_{px}, r_{py}) = \sum_t i_p(t) \cdot \delta(t) = i_p(0) \quad (3.7)$$

Damit ergibt sich die polarimetrische Bildmatrix  $I_{\{\Phi, \Theta\}}(r_{px}, r_{py})$  je nach vorliegendem Polarisationszustand an Sender und Empfänger, wobei Gleichung 3.8 die Gesamtleistung bzw. die Intensitätsverteilung  $I(r_{px}, r_{py})$  definiert.

$$I(r_{px}, r_{py}) = \sqrt{|I_{\Phi\Phi}(r_{px}, r_{py})|^2 + |I_{\Phi\Theta}(r_{px}, r_{py})|^2 + |I_{\Theta\Phi}(r_{px}, r_{py})|^2 + |I_{\Theta\Theta}(r_{px}, r_{py})|^2} \quad (3.8)$$

Anhand der Filterfunktion  $h$  lassen sich verschiedene Modellannahmen zum beleuchteten Objekt bzw. zur Wellenausbreitung in das Bildgebungsverfahren einbeziehen, wodurch das zugrundeliegende inverse Problem bei der Transformation der Zeitbereichsdaten in den Bildbereich näherungsweise gelöst wird. Im Folgenden werden einige Beispiele für Filterfunktionen gegeben.

### 3.2.1. Einfache kohärente Integration

Aus dem Huygenschen Prinzip lässt sich als Ursache einer Elementarwelle ein punktförmiger Körper ableiten, welcher eine Kugelwellenausbreitung gemäß der Greenschen Funktion hervorruft. In diesem Fall besteht die Annahme, dass sich das empfangene Signal nicht in seiner Wellenform sondern nur in seiner zeitlichen Position vom ausgesendeten Signal unterscheidet. Die Kompensation der Verzögerung wird dabei durch die Filterfunktion  $h$  gemäß (3.9) gewährleistet.

$$h(t, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_{Tx}, \mathbf{r}_{Rx}) = \delta(t - \tau(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_{Tx}, \mathbf{r}_{Rx})) \quad (3.9)$$

Die Verzögerung  $\tau$  ergibt sich dabei aus dem Ausbreitungsweg des Radarsignals und der zugrundeliegenden Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium. Im Fall unbekannter und inhomogener Medien ist  $c$  eine Funktion des Ortes und muss separat geschätzt werden [86]. Ein weiteres Optimierungskriterium ist die zusätzliche Verzögerung  $\tau_0$ , welche gemäß (3.7) zu einer leichten Verschiebung des Integrationsignals verwendet wird.

$$\tau = \frac{|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_{Tx}| + |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_{Rx}| + \tau_0}{c} \quad (3.10)$$

In der kohärenten Integration der Messdaten liegt ein Grundprinzip der Radarbildgebung, womit (3.9) elementarer Bestandteil aller folgende Verfahren ist.

#### 3.2.2. Kohärente Integration nach Kirchhoff

Die in (2.2) gegebene Wellengleichung des elektrischen Feldes beschreibt die räumlichen und zeitlichen Zusammenhänge der vektoriellen Feldgröße in Form einer partiellen Differentialgleichung. In kartesischen Koordinaten lassen sich aus dieser Notation leicht drei skalare Wellengleichungen der einzelnen Feldkomponenten ableiten, welche eine ähnliche Form besitzen. Unter der Annahme, dass die Ausbreitung einer skalaren Kugelwelle auf einer weit entfernten planen Oberfläche beobachtet wird, bietet das Kirchhoff-Integral die Möglichkeit die Wellenausbreitung zum Ursprungspunkt des Skalarwelle zum Zeitpunkt  $t = 0$  zurückzuführen. Daraus lässt sich eine Filterfunktion (3.11) ableiten, welche bei Implementierung im Zeitbereich als *Kirchhoff Migration* [82, 87] bzw. im Frequenzbereich als *f-k* oder *Stolt-Migration* [64, 88, 89] bezeichnet wird. Aufgrund der Anordnung der Empfangsantennen in einer Ebene kann nicht identifiziert werden in welchen Halbraum sich der Ausgangspunkt der Welle befindet. Die sich dadurch bildende Mehrdeutigkeit führt zu einer Beschränkung der Methode auf die Verwendung gerichteter Antennen, welche nur einen Halbraum beleuchten. Deshalb wird dieses Verfahren häufig im Fall eines Boden- oder Wandradars zur Bildgebung eingesetzt.

$$h(t, \mathbf{r}_p, \mathbf{r}_{Tx}, \mathbf{r}_{Rx}) = \frac{4 \cos(\Omega)}{c |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_{Tx}| + |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_{Rx}|} \frac{\partial \delta}{\partial t} * \delta(t - \tau) \quad (3.11)$$

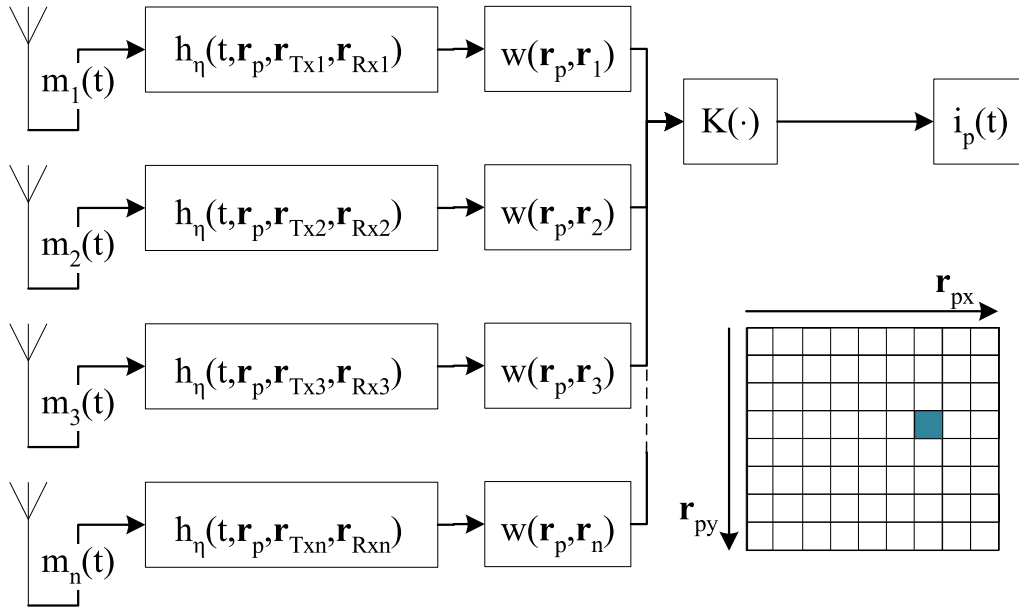
Als charakteristisches Merkmal der Kirchhoff-Migration besteht die Berücksichtigung der Distanz zwischen Sensor und Pixel sowie die Integration der ersten Ableitung der Messgröße. Weiterhin wird die Summenbildung mit dem Winkels zwischen Normalenvektor der Ebene und Ortsvektor des Pixels  $\Omega$  gewichtet.

### 3.2.3. Modellbasierte Migration

Die bisher beschriebenen Integrationsverfahren lassen sich vereinfacht als reine Zuordnungs- und Überlagerungsverfahren beschreiben. Dabei erfüllt die Filterfunktion  $h$  die Lösung des inversen Bildgebungsproblems im Sinne einer Abbildung von Messdaten auf einen Bildbereich. Durch additive Überlagerung der Einzelbilder jedes Sensorpaars ergibt sich somit ein fokussiertes Bild, welches durch die Ausnutzung der gebildeten synthetischen Apertur mit steigender Anzahl an Sensoren an erreichbarer Auflösung gewinnt. Implizit wird dabei von punktförmigen Streuobjekten ausgegangen, welche ein omnidirektionales Rückstreuverhalten aufweisen. Diese Annahme verliert jedoch bei ausgedehnten Objekten und insbesondere bei einer geringen Anzahl an Sensoren ihre Gültigkeit, da der tatsächliche Ort der Reflexion am Objekt für unterschiedliche Sensoren unterschiedlichen Bildbereichen zuzuordnen ist. Die in Abbildung 3.5 dargestellte bildgebende Signalverarbeitungsstruktur bietet drei geometrische Freiheitsgrade, um verschiedene Aspekte von Rückstreu- und Ausbreitungsmodellen zu berücksichtigen:

- Kombinationsfunktion  $K(\cdot)$  der Sensorsignale
- Wichtungsfunktion  $w$  zur Umsetzung von Ausbreitungsmodellen
- Anpassung der nach (3.10) eingeführten Verzögerung je nach Modell eines verteilten Objekts

Abbildung 3.6 veranschaulicht die modifizierte Bildgebungsstruktur. Konventionelle Integrationsverfahren bieten eine Kombination der gefilterten Sensorsignale in Form einer einfachen Summation oder Bildung des arithmetischen Mittelwerts. Bei *kreuzkorrelierenden Bildgebungsverfahren* wird diese Operation durch andere statistische Auswertungsmethoden wie den geometrischen Mittelwert oder Minimum- bzw. Maximumoperator ausgetauscht. In diesem Fall wird wie in (3.9) das Rückstreumodell eines Punkstreuers angewendet. Durch eine von der Sensorposition oder dem Aspektwinkel zwischen Sensor und Pixel abhängigen Wahl der Wichtungsfunktion  $w(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_n)$ , können eng nebeneinander liegende Sensoren unterdrückt werden. Der Vorteil in der Nutzung der Sensorsignale weit auseinander liegender Sensoren ergibt sich aus dem Modell der omnidirektionalen Rückstreuung. Verteilte Objekte können dabei während der Bildgebung unterdrückt werden, wodurch weniger Bildartefakte und Mehrdeutigkeiten im Bildbereich entstehen [90, 91]. Für eine derartige Zerlegung des Bildbereichs in kanonische Objekttypen wie Punkstreuer, flächige Objekte oder zirkulare Strukturen ist es erforderlich für jeden Objekttyp ein eigenes Rückstreumodell  $h_\eta$  zu definieren. Dabei wird eine räumliche Veränderung des eigentlichen Reflexionspunkts auf der Oberfläche des beleuchteten Objekts in der Berechnung der zu erwartenden Verzögerung berücksichtigt [92]. Da Lage, Skalierung und Orientierung des Objekts als Modellparame-



**Abbildung 3.6.:** Blockschaltbild modellbasierter bildgebender Signalverarbeitung: Rückstreumodelle verteilter Objekte fließen in die Filterfunktion  $h_\eta$  ein. Geometrische Aspekte der Sensoranordnung werden durch eine ortsabhängige Wichtungsfunktion  $w$  umgesetzt. Weiterhin können die statistischen Eigenschaften des Bildbereichs durch Anpassung der Kombinationsfunktion  $K$  modifiziert werden.

ter vorhanden sind, nehmen solche modellbasierten Bildgebungsverfahren implizit eine Schätzung der Modellparameter vor, auch wenn die Bildbereichstransformation weiterhin wie in Abbildung 3.6 dargestellt über eine Kombination der Sensorsignale der Messdaten erfolgt.

### 3.2.4. Weitere Abbildungsverfahren

Abzugrenzen davon sind Verfahren, welche aufgrund eines Rückstreumodells eine Anpassung der Modellparameter an die Messdaten vornehmen, um auf Grundlage von Optimierungsverfahren einen Bildbereich zu schätzen, welcher eine Rekonstruktion der Messdaten oder dominanter Wellenfronten ermöglicht. Dabei kann die räumliche Ausdehnung der Grenzschichten zwischen Ausbreitungsmedien hochauflösend geschätzt und rekonstruiert werden. Diese als *Boundary Scattering Transformation* bekannten Verfahren werden häufig für die Schätzung der Oberfläche von Objekten eingesetzt [93–98]. Bei breitbandigen Messdaten werden dabei die vom beleuchteten Objekt zurück gestreuten Wellenfronten extrahiert und im Bereich zusammenhängender und differenzierbarer Oberflächenabschnitte an ein Oberflächenmodell angepasst. Die Intensität der Messdaten wird dabei

nicht in den Bildbereich transformiert, da nur die Modellparameter in Form der geschätzten Oberflächenelemente repräsentiert werden. Zentraler Ausgangspunkt der Oberflächenrekonstruktion besteht in der Lokalisierung der Reflexionspunkte am Objekt, wobei aktuelle Untersuchungen den Mehrwert orthogonaler polarimetrischer Kanäle des Radar-Systems für eine robustere Lokalisierung nutzen [99]. Diese Art von Abbildungsverfahren ist jedoch kein Gegenstand dieser Arbeit, wodurch lediglich auf Publikationen zu diesem Thema verwiesen wird.

### 3.3. Polarimetrie in der Nahbereichserkundung

Methoden der Zerlegung und Klassifikation polarimetrischer Radar-Daten wurden bisher auf abstrakte Streumatrizen angewendet. Diese liegen zunächst im Zeit- bzw. Frequenzbereich durch die Verwendung orthogonaler polarimetrischer Messkanäle vor und können wie bspw. in der klassischen Radar-Fernerkundung üblich in den Bildbereich transformiert werden. Dabei beinhaltet die in Gleichung 3.12 definierte Streumatrix der Radar-Daten einen Phasenterm, welcher von der absoluten Entfernung zwischen Sensor und Objekt verursacht wird.

$$\mathbf{S}(\mathbf{r}, t) = \begin{bmatrix} M_{\Phi\Phi}(\mathbf{r}, t) & M_{\Phi\Theta}(\mathbf{r}, t) \\ M_{\Theta\Phi}(\mathbf{r}, t) & M_{\Theta\Theta}(\mathbf{r}, t) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Eine Transformation durch ein bildgebendes Verfahren hat eine Fokussierung eines in den Radar-Daten verteilten Streumechanismus auf einen lokal begrenzten Bildbereich zur Folge. Neben einer möglichen Lokalisierung des Mechanismus bietet dieses Vorgehen zudem die Kompensation des entfernungsabhängigen Phasenterms und damit die Darstellung des Streumechanismus in einer gemittelten Form. Jeder Pixel  $I(r_{px}, r_{py})$  wird demnach aus einer gemittelten Gruppe an Entfernungszellen generiert, wobei eine kohärente Summation der Einzelbeiträge erforderlich ist.

$$\mathbf{S}(r_{px}, r_{py}) = \begin{bmatrix} I_{\Phi\Phi}(r_{px}, r_{py}) & I_{\Phi\Theta}(r_{px}, r_{py}) \\ I_{\Theta\Phi}(r_{px}, r_{py}) & I_{\Theta\Theta}(r_{px}, r_{py}) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Bestehende breitbandige Verfahren der Radar-Polarimetrie verfolgen je nach Anwendungsfall verschiedene Ziele der polarimetrischen Signalverarbeitung. Häufig dienen orthogonale polarimetrische Kanäle lediglich als zusätzliche unabhängige Informationsquelle zur Erhöhung der Detektionswahrscheinlichkeit, wobei eine Extraktion zugrundeliegender Streumechanismen nicht erzielt wird. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick aktueller Forschungsbestrebungen und Anwendungsfelder polarimetrischer Nahbereichsanwendungen wobei die Art der Nutzung polarimetrischer Informationen thematisiert wird.

#### 3.3.1. Objekterkennung und RCS-Bildgebung

Besonders in der bildgebenden RCS-Messtechnik werden die klassischen Ziele der Radar-Fernerkundung mithilfe polarimetrischer Mess- und Analysemethoden umgesetzt. Es geht dabei um die Identifikation und Lokalisierung von Rückstreuungsmechanismen, um die elektromagnetischen Verhältnisse bei der Beleuchtung eines Testobjekts modellieren zu können. Die Untersuchung einer einzelnen Sendempfangs-Polarisation bietet in der klassischen RCS-Bildgebung eine Intensitätsverteilung im Bildbereich aus der die Form beleuchteter Objekte und der Ort besonders dominanter Rückstreuung extrahiert werden können. Polarimetrische RCS-Analyse eröffnet in diesen Anwendungen einen tieferen Einblick über die ursächlichen Mechanismen am Objekt, was für das Verständnis der Rückstreuung und etwaige Optimierungsmaßnahmen wie Minimierung oder Maximierung der Objekt-RCS von großer Bedeutung sind [42, 100].

In den letzten Jahren trugen zudem Sicherheitsanwendungen wie der in [101] vorgestellte Körperscanner maßgeblich zur Verwendung polarimetrischer Radarsysteme bei, da aufgrund der Hinzunahme eines kreuzpolaren Bildgebungskanals eine erhöhte Wahrscheinlichkeit der Detektion versteckt getragener Waffen am Körper oder Gegenständen als reiner Diversitätsgewinn erreicht werden kann [102, 103]. Im Bereich der UWB-Bildgebung wurde anhand verschieden orientierter Waffen die Abhängigkeit der beobachteten Streumatrix vom Aspektwinkel wie in Gleichung 2.24 anhand einer Rotationsmatrix beschrieben. Zur Identifikation geradzahlgiger und ungeradzahlgiger Reflexionen wurde zudem die Pauli-Zerlegung auf Bildbereichsdaten angewendet [104].

Dieses Vorgehen kohärenter Zerlegung setzt die Trennbarkeit einzelner Streumechanismen im Bildbereich voraus. Überlagern sich mehrere Mechanismen innerhalb eines Pixels können die Einzelkomponenten nicht mehr durch Verfahren wie der Pauli-Zerlegung erschlossen werden. Im Fall direkt am Körper getragener Gegenstände kommt es zu einer Überlagerung der Rückstreuung der Haut und direkt darunter liegender Schichten mit relativ hohem Wassergehalt und den unmittelbar damit überlagerten Rückstreuung der gesuchten Objekte. Besonders die Detektion dielektrischer Medien wie kristallinen Substanzen, Keramik oder Sprengstoffen wird zudem durch die Ähnlichkeit der elektrischen Eigenschaften erschwert. Dennoch konnte durch Anwendung der  $HA\bar{\alpha}$ -Zerlegung eine Unterscheidung verschiedener auf einer Metallplatte befestigter Testobjekte gewährleistet werden [105]. Dabei konnte die dominante Reflexion der Metallplatte als stärkster Eigenwert permanent in alle Bildbereiche identifiziert werden. Folglich wird die Entropie bzw. die Zufälligkeit der Rückstreuung nur leicht durch die versteckten Gegenstände beeinflusst. Entsprechend gering sind die Variationen von Entropie und Alpha um die erwartbaren Werte einer dominanten Einzelreflexion von  $H \approx 0$  und  $\bar{\alpha} \approx 0$ . Eine Unterscheidung der Testobjekte untereinander stellt jedoch aufgrund der hohen

Ähnlichkeit der Streumechanismen eine Herausforderung für weitere Forschungsvorhaben dar.

In einigen Anwendungen genügt die Detektion des Vorhandenseins verdächtiger Rückstreumechanismen ohne konkrete Lokalisierung im Bildbereich. Hierzu wurden Untersuchungen mit einem polarimetrischen Radar-System mit 7 GHz Bandbreite bei 60 GHz Mittenfrequenz durchgeführt, um unter der Kleidung getragene Drähte zu identifizieren [106, 107]. Aufgrund der hohen Bandbreite ergibt sich die Möglichkeit einer Analyse der polarimetrischen Daten im Zeitbereich, wobei jede Entfernungszelle anhand der Eigenschaften ihrer Kovarianzmatrix analysiert wird. Ähnlich zu einer zuvor ausgeführten Bildgebung entfällt der ortsabhängige absolute Phasenterm der Streumatrix. Weiterhin können inkohärente Zerlegungsverfahren bei der Überlagerung verschiedener Mechanismen auf die Entfernungszellen angewendet werden. Durch Analyse der Abhängigkeit der schwächeren Eigenwerte vom Aspektwinkel zum Oberkörper, konnte eine Unterscheidung von Personen anhand des Vorhandenseins von Drähten vorgenommen werden.

Die bisher aufgeführten Publikationen zeigen Machbarkeitsstudien und Laboruntersuchungen für unterschiedliche Anwendungen und Frequenzbereiche von einigen GHz [42, 100, 102–104] bis in den mm-Wellenbereich um 60 GHz [101, 106, 107] oder 100 GHz [105]. Dabei hat die Wahl des Frequenzbereichs Auswirkungen auf die zur Verfügung stehende Bandbreite und die elektrischen Eigenschaften der beleuchteten Objekte. Gemeinsames Merkmal der Untersuchungen ist die Verwendung einer synthetischen Apertur durch Rotation des Testobjekts oder Positionierung der Antennenanordnung unter Laborbedingungen. Im Folgenden werden einige Publikationen aus dem Bereich der Robotik erläutert, welche polarimetrische Systeme zur Erkundung und Kartierung unbekannter Umgebungen einsetzen.

### 3.3.2. Lokalisierung, Kartierung und Rekonstruktion einer Umgebung

Der Bereich der UWB-Radar-Sensorik bietet besonders für mobile Anwendungen der Robotik großes Einsatzpotential, da es die technologischen Möglichkeiten zulassen, miniaturisierte und energieeffiziente Sensoren mit hoher Bandbreite zu fertigen. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms *UKoLoS* wurden verschiedene Themen der Abbildung unbekannter Umgebungen mithilfe mobiler und autonomer Sensorplattformen adressiert. Bei bekannter Trajektorie während der gesamten Messzeit können die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Bildgebungsverfahren direkt umgesetzt werden, da sämtliche Positionsinformationen der Antennen zur Verfügung stehen. Für den Fall mehrerer in der Umgebung verteilter kooperativer Sensoren besteht zudem die Möglichkeit der Bildung eines Sensornetzwerks, welches unter Nutzung einer Vielzahl von Sender-Empfänger-Kombinationen multistatische



Bildgebungsmethoden anwenden können [108–110]. Hierzu wurden verschiedene Sensortopologien untersucht, welche sich aus statischen und mobilen Knoten zusammensetzen und sich Aufgaben der grundsätzlichen Kartierung der Umgebung und der detaillierten Inspektion einzelner Objekte aufteilen können.

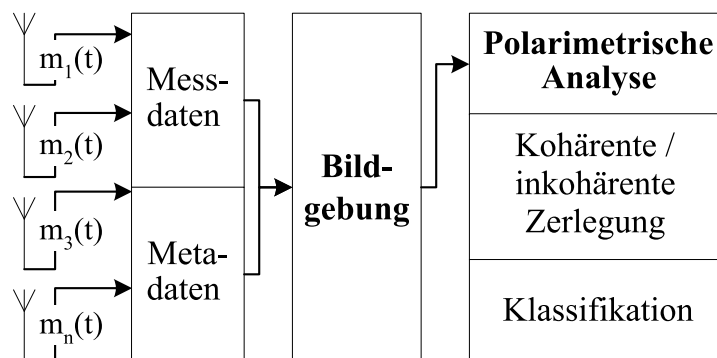
Polarimetrische Methoden bieten in diesem Zusammenhang das Potential detaillierte Informationen über Rückstreumechanismen an Objekten oder der Umgebung bereitzustellen. Zur Aufgabe von Kartierung und Umgebungsabbildung stellen bereits sehr einfache Methoden wie die Pauli-Zerlegung eine Unterscheidung von Wänden und Ecken im Bildbereich zur Verfügung, welche mit bereits aus reinen Intensitätsverteilungen gewonnenen Informationen fusioniert werden können [111]. Zur genaueren Inspektion einzelner Objekte dienen zudem Methoden der Objekterkennung, wobei die Identifikation von Flächen, Ecken und Kanten im Bildbereich Ziel zahlreicher Untersuchungen waren [112].

Für bildgebende Anwendungen der UWB-Radar-Sensorik ist die Bewegung und Positionsinformation des Sensors eine wichtige Voraussetzung zur Bildgebung. Fragen der Wegfindung und Bestimmung der eigenen Position stellen in vollkommen unbekannten Umgebungen keine trivialen Aufgaben dar. Mithilfe von Verfahren der Koppelnavigation kann eine bewegte Plattform ihre Orientierung und Position in einem lokalen Koordinatensystem definieren, wobei die akkumulierenden Fehler gemäß der Fehlerfortpflanzung mit größerer Messzeit die eigene Positionierungsgenauigkeit verringern. In solchen Situation, welche bis heute Gegenstand der Forschung im Bereich der Robotik und des autonomen Fahrens sind, ist eine topologische Sortierung der Abhängigkeiten der Bildgebung (Position und Bewegung des Sensors) und Wegfindung (Abbildung der Umgebung) nicht möglich. Diese Fälle erfordern stattdessen Methoden der simultanen Lokalisierung und Kartierung (simultaneous localization and mapping, SLAM), wobei in inkrementellen Schritten eine Karte der Umgebung und entsprechende Bewegungsanweisungen des Sensors abgeleitet werden [113–115].

In einem einzelnen inkrementellen Schritt werden die bereits vorhandenen Messdaten im lokalen Koordinatensystem abgebildet. Bildgebungsergebnisse aus dem nächsten Schritt beinhalten Merkmale bereits bekannter Areale und werden entsprechen assoziiert. Analog zum Verhalten einer Fledermaus lässt sich dazu ein auf Bildgebungsvorschrift ableiten (Bat Type Imaging, [108, 116]). Die partiellen Abbildung benachbarter Positionen werden dabei anhand markanter Orientierungspunkte der Umgebung zu einem größeren Bereich fusioniert. Im Fall eines Sensors mit einer Sende- und zwei Empfangsantennen wurde eine Erkennung von Objektmerkmalen auf Grundlage der Korrelation beider Empfangssignale vorgestellt, welche auf der Erkennung von typischen Differenzen in Verzögerungszeiten zu flächigen oder punktförmigen Objekten beruht. Polarimetrische Methoden könnten hierbei der Identifikation von charakteristischen Objektmerkmalen wie der Anordnung von Ecken und Kanten an einem Objekt dienen.

### 3.3.3. Zusammenfassung

Bildgebende Signalverarbeitung in Radar-Systemen synthetischer Apertur wird in der überwiegenden Mehrzahl der Anwendungen und Forschungsvorhaben als getrennte Verarbeitungsstufe zur polarimetrischen Zerlegung betrachtet. Je nach Anwendungsgebiet wie bspw. der klassischen luft- und raumgestützten Fernerkundung ist dieses Vorgehen notwendig, da die Randbedingungen der Beleuchtungsgeometrie und Systemcharakteristika eine Extraktion polarimetrischer Parameter erst nach erfolgter Bildgebung zulassen. Entscheidend hierbei ist die Fähigkeit des Messsystems einzelne Streumechanismen, im Zeit- oder Winkelbereich bei Verwendung elektrisch großer Antennen, aufzulösen. Ist dies nicht der Fall gewährleistet eine Transformation der Radar-Daten in den Bildbereich eine Fokussierung bzw. Trennbarkeit von einzelnen oder einigen wenigen Streumechanismen in einzelnen Pixeln, welche wie in Abbildung 3.7 dargestellt anschließend einer polarimetrischen Analyse unterzogen werden können. Besteht eine hohe Abhängigkeit



**Abbildung 3.7.:** Schematische Darstellung der allgemeinen Signalverarbeitungsschritte der Radar-Polarimetrie. Bildgebende Verfahren werden im Allgemeinen getrennt von der polarimetrischen Analyse betrachtet. Zerlegungs- und Klassifikationsverfahren werden daher auf polarimetrische Pixel im Bildbereich angewendet.

des beobachteten Streumechanismus vom Aspektwinkel zum Sensor, führt die Anwendung von Bildgebungsverfahren jedoch zu einer Verfälschung der abgebildeten Streumechanismen, da lediglich eine Mittelung der Radar-Daten im Bildbereich dargestellt werden kann. Im folgenden Abschnitt werden diese Fragestellungen anhand synthetisierter Radar-Daten näher thematisiert. Bei einigen kanonischen Objekten wie dünnen Zylindern wird diese Abhängigkeit durch die Projektion des Mechanismus in die Sende-Empfängerebene hervorgerufen. Im Fall komplexer Objekte kann eine Änderung des Aspektwinkels zur Anregung verschiedener Streumechanismen führen, welche durch bildgebende Verfahren überlagert werden.

## 4. UWB-Polarimetrie zur Radar-Bildgebung im Nahbereich

### Einordnung

In den vorangegangenen Abschnitten konnte die durch polarimetrische Auswertung zugänglich gemachte Informationsvielfalt von Radar-Daten im Bezug auf physikalische Eigenschaften beleuchteter Objekte verdeutlicht werden. Für Anwendungsszenarien breitbandiger Bildgebungssensorik erfolgt diese Auswertung bei konventioneller Verarbeitung im Bildbereich, wodurch eine Extraktion von Signaturen im Sinne polarimetrischer Pixel ortsbezogen erfolgt. Dieses Vorgehen setzt voraus, dass das Rückstreuverhalten eines beleuchteten Objekts unter den verschiedenen Aspektwinkeln zum Sensor während der Messzeit als konstant angenommen wird, da sonst keine kohärente Integration der Messdaten erfolgen kann. In diesem Fall würden polarimetrische Signaturen verschiedener Entfernungszellen der Radardaten willkürlich überlagert werden und insbesondere Informationen schwacher Rückstreuanteile maskiert werden.

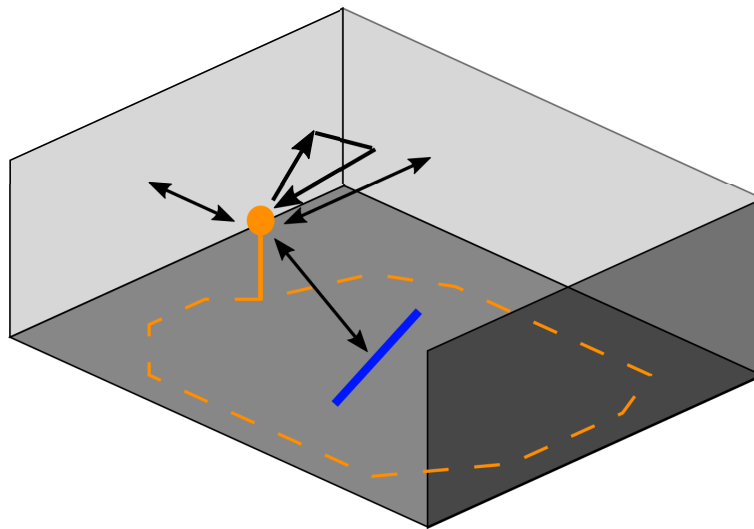
In diesem Abschnitt werden anhand von synthetischen Daten bestehende Probleme in der Interpretation von Bildbereichsdaten diskutiert und Verfahren zur Nutzung polarimetrischer Objektinformationen im Zeitbereich vorgestellt. Im Gegensatz zu schmalbandigen Radar-Verfahren ist eine Fokussierung der Messdaten keine Voraussetzung zur Extraktion kohärenter Rückstreumechanismen sofern die Bandbreite des Messsystems ausreicht, einzelne Mechanismen bereits im Zeitbereich voneinander zu trennen. Daraus ergeben sich zahlreiche Freiheitsgrade in der Analyse von Radar-Daten, welche für eine anschließende Bildgebung genutzt werden können.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Methoden der Zeitbereichszerlegung in Abschnitt 4.2 und der iterativen Verbundzerlegung von Zeit- und Bildbereich in Abschnitt 4.3 stellen den maßgeblichen eigenen Beitrag dieser Arbeit dar, welcher in Konferenzbeiträgen präsentiert wurde [117–122]. In Abschnitt 6 wird nochmals eine kurze Zusammenfassung der erforschten Sachverhalte der Einzelveröffentlichungen gegeben.

## 4.1. Auswertung von Bildgebungsresultaten

### 4.1.1. Angewandte Methodik

Bevor die Anwendbarkeit der Verfahren auf reale Messdaten im folgenden Kapitel 5 gezeigt wird, beschäftigt sich dieser Abschnitt mit der Verdeutlichung deren Funktionsweise und Wirkprinzip. Zu diesem Zweck wurden Radardaten eines breitbandigen Sensors für ein gegebenes Szenario synthetisiert. Abbildung 4.1 zeigt die Simulationsgeometrie bestehend aus einem mit drei Wänden begrenzten Bereich in dessen Zentrum ein Objekt als Radarziel platziert ist. Ein monostatischer Sensor zeichnet während der Bewegung durch den Raum kontinuierlich Radardaten auf. Als Radarziel dient ein um  $45^\circ$  geneigter metallischer Stab, welcher nach (2.16) eine



**Abbildung 4.1.:** Simulationsszenario: Ein monostatischer Sensor bewegt sich durch eine von drei Wänden begrenzte Umgebung um ein Objekt herum. Die Rückstreuung von Wänden, Ecken und dem  $45^\circ$  geneigten Stab, wurde anhand von RCS-Simulationen synthetisiert.

Streumatrix mit dem Mechanismus eines orientierten Zylinders aufweist. Überlagert wird diese schwache Rückstreuung von dominanteren Mechanismen der Wände und Ecken des Raumes gemäß (2.14) und (2.15). Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht der Systemparameter. Die in Abbildung 4.2 dargestellten synthetisierten Radardaten sind für 4 polarimetrische Kanäle gemäß (2.13) in Abhängigkeit der Position und der Verzögerungszeit getrennt dargestellt. Da eine monostatische Antennenkonfiguration verwendet wurde, sind die kreuzpolarisierten Kanäle gemäß der Symmetriebedingungen der Streumatrix identisch. Für die Simulation wurde die Mehrwegeausbreitung innerhalb des Raumes nicht berücksichtigt, womit sich die

**Tabelle 4.1.: Parameter der Simulation**

Parameter	Wert
Frequenzband	500MHz – 3500MHz
Antennenkonfiguration	monostatisch, omnidirektional
Polarisationszustände	orthogonale $\Phi$ - und $\Theta$ -Polarisation an Tx und Rx
Anzahl der Positionen	650
Rückstreumechanismen	Wand, Zweiflächiger Reflektor, Orientierter Dipol

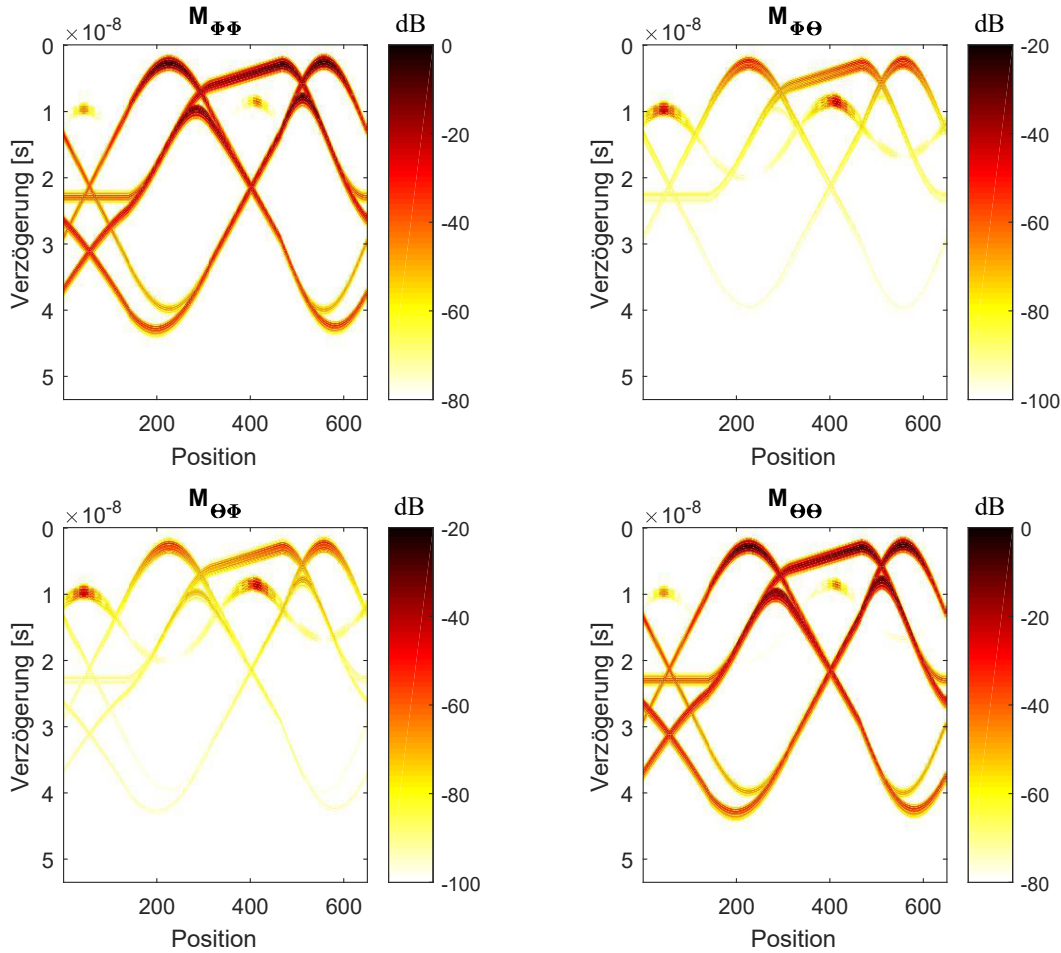
Modellierung der Ziele (Wand, Ecke, Stab) als Punktziel mit raumwinkelabhängiger Impulsantwort ergibt. Zur Transformation der Radar-Daten in den Bildbereich kam die in (3.7) und (3.11) eingeführte Kirchhoff Migration zur Anwendung. Der Winkelparameter wurde dabei aufgrund der Verwendung ungerichteter Antennen als Konstante  $\Omega = 0^\circ$  gesetzt. Abbildung 4.3 zeigt die konventionellen Bildgebungsresultate ohne Anwendung modellbasierter Verfahren für die einzelnen polarimetrischen Kanäle. Gemäß Gleichung 3.13 definieren sich damit räumliche Streumatrizen  $\mathbf{S}(r_{px}, r_{py})$ , welche anschließend analysiert werden können.

#### 4.1.2. Interpretierbarkeit von Bildgebungsresultaten

##### Visuelle Inspektion numerischer Resultate

In den Abbildungen der kopolarisierten Kanäle auf der Hauptdiagonalen fällt der hohe Anteil an Bildartefakten und Mehrdeutigkeiten auf. Es wird deutlich, dass sich Rückstreukomponenten aller vorhandener Objekte in bestimmten Regionen des Raumes konstruktiv überlagern und Fehlabbildungen sowie eine hohes Niveau von Hintergrundrauschen erzeugen. Das Radarziel in der Mitte des Raumes kann in den kopolarisierten Abbildungen nicht wahrgenommen werden, da es in seiner Intensität unterhalb des Rauschniveaus liegt. Wände und Ecken des Raumes sind erkennbar, bilden jedoch klare Mehrdeutigkeiten aus. Diese kennzeichnen sich durch gespiegelte Abbildungen der platzierten Objekte am Bewegungspfad des Sensors.

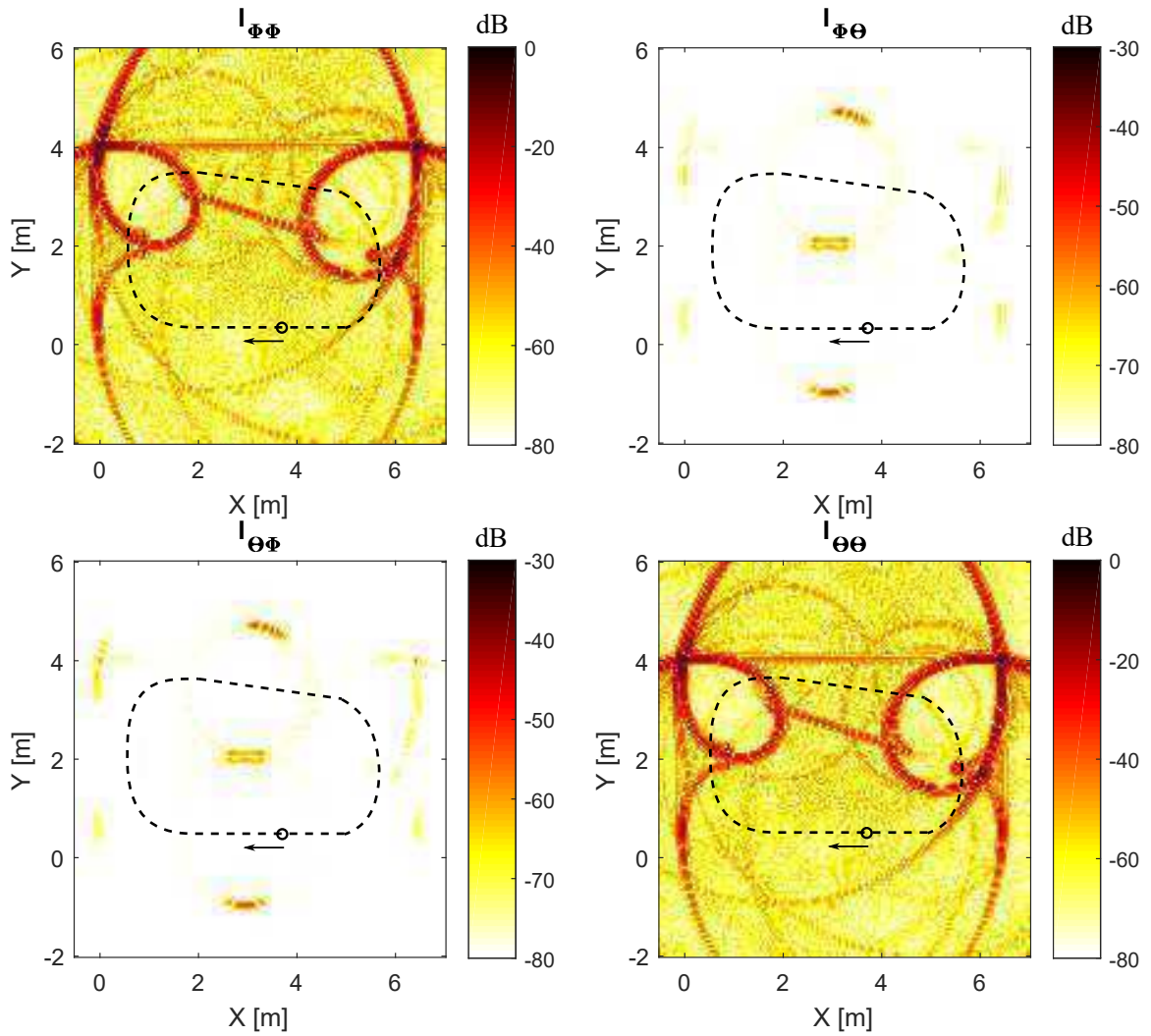
Ein weiteres Qualitätskriterium der einzelnen polarimetrischen Kanäle stellt die korrekte Form der aus dem Bildbereich extrahierbaren Streumatrizen dar. Zieht man die bekannten polarimetrischen Signaturen der Objekte des Raumes heran und vergleicht sie mit den fokussierten Abbildungen ergeben sich die in Tabelle 4.2 aufgelisteten Merkmale mit Bezeichnung der X-Y-Position im Raum und dazugehöriger Angabe der Verzögerungszeit und Messposition in den Radardaten. Die extrahierten Streumatrizen von Zeit- und Bildbereich ergeben sich bei ungestörter Überlagerung in identischer Form. Für die Mechanismen einfacher und zwei-



**Abbildung 4.2.:** Synthetisierte Radardaten der Geometrie aus Abbildung 4.1

facher Reflexionen an Ecken und Wänden des Raumes ergibt sich demnach eine starke Ähnlichkeit mit den idealen normierten Streumatrizen. Obwohl die Geometrie des Raumes eine Symmetrieebene durch das Radarziel aufweist, sind dennoch die Messpositionen nicht symmetrisch angeordnet, wodurch gewisse Unterschiede zwischen gleichen Mechanismen (wie bspw. linker und rechter Ecke) in den Bildbereichsdaten entstehen. Unter realen Bedingungen (Mehrwegeausbreitung, Übersprechen etc.) ist diese Aussage nicht zwangsläufig übertragbar auf Messdaten.

Der als Radarziel in der Mitte des Raumes platzierte  $45^\circ$  geneigte Stab kann im Bildbereich nicht anhand seiner idealen Streumatrix identifiziert werden. Vielmehr gleicht die Form der Matrix einem Wandmechanismus. Bei genauer Betrachtung der Radar-Daten im Zeitbereich ergeben sich je nach Aspektwinkel des monostatischen Sensors zum Objekt zwei unterschiedliche Streumatri-



**Abbildung 4.3.:** Bildgebungsresultat: Mithilfe der Kirchhoff Migration wurden die Zeitbereichsdaten in den Bildbereich transformiert. Als Grundlage dienen synthetisierte Radardaten, welche verschiedene Objekte mit dazugehörigen Rückstreumechanismen beinhalten. Die Bewegung des Sensor ist anhand der gestrichelten Linie nachvollziehbar.

zen, obwohl der zugrundeliegende Mechanismus identisch ist. Die kopolarisierten Elemente auf der Hauptdiagonalen bleiben nahezu identisch auch bei Wechsel des Azimut-Aspektwinkels um  $180^\circ$ . Ein Vorzeichenwechsel der kreuzpolarisierten Komponenten lässt sich auf die Änderung der Ausrichtung des  $\Phi - \Theta$ -Referenzkoordinatensystems zurückführen. Der Bezug zwischen beiden Einheitsvektoren ändert sich durch die Bewegung des Sensors von  $90^\circ$  auf  $-90^\circ$ . Ohne Kompensation dieses Effekts löschen sich die kreuzpolarisierten Anteile bei der Integra-

**Tabelle 4.2.:** Räumliche und zeitliche normierte Streumatrizen im Vergleich: Die angegebenen Verzögerungszeiten, Messpositionen und X-Y-Positionen beziehen sich auf exemplarische Teile der Zeit- und Bildbereichsdaten in Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3

Objekt	Bildbereich		Zeitbereich		
	Bezeichnung	[X, Y] [m]    Streumatrix	$\tau$ [ns]	Pos.	Streumatrix
linke Ecke	[0.0, 4.0]	$\begin{bmatrix} 0.74 & 0 \\ 0 & -0.66 \end{bmatrix}$	11	290	$\begin{bmatrix} 0.72 & 0 \\ 0 & -0.70 \end{bmatrix}$
rechte Ecke	[6.5, 4.0]	$\begin{bmatrix} 0.72 & 0 \\ 0 & -0.70 \end{bmatrix}$	8.5	515	$\begin{bmatrix} 0.72 & 0 \\ 0 & -0.70 \end{bmatrix}$
. Wand 1	[0.0, 0.5]	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.72 \end{bmatrix}$	3	230	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$
Wand 2	[3.0, 4.0]	$\begin{bmatrix} 0.77 & 0 \\ 0 & 0.64 \end{bmatrix}$	5.5	400	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$
Wand 3	[6.5, 0.5]	$\begin{bmatrix} 0.69 & 0 \\ 0 & 0.72 \end{bmatrix}$	3	460	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$
Stab (1)	[3.0, 2.0]	$\begin{bmatrix} 0.77 & -0.06 \\ -0.06 & 0.63 \end{bmatrix}$	9	420	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.51 & 0.49 \end{bmatrix}$
Stab (2)	[3.0, 2.0]	$\begin{bmatrix} 0.77 & -0.06 \\ -0.06 & 0.63 \end{bmatrix}$	10	50	$\begin{bmatrix} 0.47 & -0.53 \\ -0.53 & 0.47 \end{bmatrix}$

tion im Bildbereich aus.

In [34] wird dieser Effekt im Zusammenhang von RCS-Messungen und entsprechender Bildgebung detailliert untersucht und ein Verfahren zur Transformation des Koordinatensystems vorgestellt. Dieser Ansatz überführt das  $\Phi - \Theta$ -Koordinatensystem, dessen Orientierung von der Position und Ausrichtung der Antennen im Raum abhängig ist, in ein auf den Bildbereich bezogenes kartesisches x-y-Koordinatensystem. Nach der Fokussierung erfolgt eine Rücktransformation, wodurch eine polarimetrische Analyse im Bildbereich ermöglicht wird. Zur Untersuchung der Projektion kanonischer Streumatrizen wurden in [119] polarisations-



selektive Objekte wie dünne Zylinder anhand ihres Radar-Querschnitts untersucht. Weiterhin wurde ein modellbasiertes Verfahren zur Kompensation der Objektorientierung eingeführt, welches auf einer Diagonalisierung der vom Aspektwinkel abhängigen Streumatrix basiert. Solche Transformationsverfahren stellen eine Alternative zu den in den folgenden Abschnitten detailliert dargestellten Methoden dar und wurde bereits in den aufgeführten Publikationen ausführlich thematisiert.

#### Allgemeine Fragestellungen der Interpretierbarkeit

Die in Abschnitt 3.2 eingeführten Integrationsverfahren bieten für punktförmige Objekte bzw. verteilte Objekte unter Verwendung modellbasierter Verfahren die Möglichkeit, Radardaten in den Bildbereich zu transformieren. Maßgeblich für die resultierende Qualität ist die Sicherstellung der Kohärenz der einzelnen Sensordaten vor der in Gleichung 3.5 definierten Integration der Daten. Für polarimetrische Sensoren ist dieses Kriterium gleichbedeutend mit der zu erreichenden Invarianz der polarimetrischen Signaturen des beleuchteten Objekts während der Bewegung des Sensors oder aus verschiedenen Aspektwinkeln zum Objekt. Dabei ergeben sich drei maßgebliche Ursachen der Störung der polarimetrischen Signatur in den Messdaten.

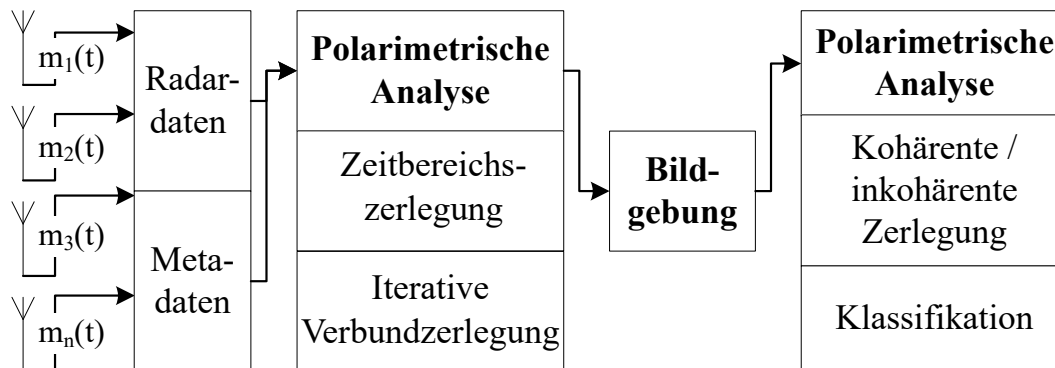
- **Geometrische Projektionseffekte:** Wie in Abschnitt 2.2.4 dargestellt, bildet sich der beobachtete Streumechanismus als Projektion der polarimetrischen Signatur des beleuchteten Objekts in die Sende- und Empfangsebene des Radarsystems ab. Diese geometrisch bedingte Projektion kann zu einer Veränderung der gemessenen Streumatrix führen, obwohl der zugrundeliegende Mechanismus unverändert bleibt.
- **Winkelabhängige Sichtbarkeit von Streumechanismen:** In realen Messdaten spielen Projektionseffekte jedoch nur eine untergeordnete Rolle, da nur bei punktförmigen Objekten mit hoher Selektivität einer bestimmten Polarisationsrichtung solche Effekte tatsächlich beobachtet werden. Bei verteilten oder ausgedehnten Objekten, führt eine Änderung des Aspektwinkels eher zu einer Änderung des angeregten Streumechanismus. Falls dieser in einer ähnlichen Entfernung zu einem anderen Mechanismus liegt, können sich beide überlagern und die Integration der Messdaten stören.
- **Überlagerung verschiedener Rückstreuikomponenten:** Bei großem Öffnungswinkel der Antennen kann der gleiche Überlagerungseffekt ebenfalls für räumlich voneinander getrennte aber in ähnlichem Abstand befindliche Objekte eintreten. Unabhängig von der Bandbreite des Messsystems werden bei Anwesenheit mehrerer Ziele automatisch unterschiedliche Rückstreuikomponenten während der Bewegung des Sensors überlagert.

Als Folge inkohärenter Integration der Radar-Daten ergeben sich zahlreiche Bildbereichseigenschaften, welche die Interpretierbarkeit der Resultate erschweren. Dazu zählen Bildartefakte oder Fehlabbildungen aus der zufälligen konstruktiven Überlagerung verschiedener Signalkomponenten. Diese Effekte werden zudem von Mehrdeutigkeiten begleitet, welche sich aus der Unterbestimmtheit des zugrundeliegenden inversen Problems ergeben. Weiterhin kommt es zu einer Verfälschung der polarimetrischen Signatur im Bildbereich mit entsprechenden Folgen für die extrahierbaren Informationen.

Zur Vermeidung einer verfälschten Integration der Radar-Daten werden im Folgenden zwei Lösungsansätze vorgestellt, welche eine vorherige Selektion einzelner Signalkomponenten vornehmen:

- Projektion der Radar-Daten auf eine Referenzbasis zur Unterscheidung sich überlagernder Mechanismen (Zeitbereichszerlegung)
- Auswertung der statistischen Eigenschaften der Radar-Daten zur Gruppierung von Mechanismen in Clustern (Iterative Verbundzerlegung)

Diese werden wie in Abbildung 4.4 dargestellt der eigentlichen Bildgebung vorangestellt und dienen somit einer Vorverarbeitung der Radar-Daten.



**Abbildung 4.4.:** Schematische Darstellung der allgemeinen Signalverarbeitungsschritte der UWB-Radar-Polarimetrie. Daten aus Mess- und Bildbereich werden anhand ihrer polarimetrischen Informationen ausgewertet, um die Interpretierbarkeit zu erhöhen.

## 4.2. Zeitbereichszerlegung polarimetrische Radar-Daten

### 4.2.1. Konzept der polarimetrischen Filterung

Die in Abschnitt 2.2.4 eingeführte Projektion eines Streumechanismus in Sende- bzw. Empfangsebene des Messsystems begründet ein grundlegendes Konzept der Optimierung der Polarisationsrichtung beider Ebenen für die Maximierung erwünschter bzw. Minimierung unerwünschter Streumechanismen. Demnach existiert ein Polarisationszustand der Sendeebene, welcher den zugrundeliegenden Streumechanismus des beleuchteten Objekts maximal anregt und einen entsprechenden Empfangsebenenzustand zur Maximierung der Empfangsleistung. Mithilfe zweier unitärer Transformationsmatrizen  $\mathbf{U}(\alpha, \beta, \varphi)$  gemäß (2.11) können die Polarisationszustände der Ebenen mit jeweils drei Parametern beliebig angepasst werden. Das Verhältnis der Empfangsleistungen beider Streumechanismen kann bspw. zum Zweck der Clutterunterdrückung als Optimierungsproblem (4.1)  $(\mathbf{U}_{Tx}, \mathbf{U}_{Rx}) = \arg(\xi \rightarrow 0)$  formuliert werden.

$$\xi = \frac{\mathbf{E}_{Rx}^T \mathbf{S}_1 \mathbf{E}_{Tx}}{\mathbf{E}_{Rx}^T \mathbf{S}_2 \mathbf{E}_{Tx}} \quad (4.1)$$

mit

$$\mathbf{E}_{Tx} = \mathbf{U}_{Tx} \mathbf{E}_{JTx} \quad \mathbf{E}_{Rx} = \mathbf{U}_{Rx} \mathbf{E}_{JRx} \quad (4.2)$$

Unter der Annahme vollständig polarisierter Wellen wurden je nach Wahl des Referenzkoordinatensystems und der letztendlichen Notation der Streumatrix verschiedene Lösungsansätze diskutiert [123, 124]. Als Lösung der Optimierung ergeben sich für Sende- und Empfangsebene Polarisationszustände, welche eine maximale Unterscheidbarkeit bzw. Kontrast zwischen zwei Streumechanismen bieten. Am Beispiel eines orientierten Dipols ergibt sich die physikalische Interpretation der Filterung als Ausrichtung einer linearen Polarisation an dessen Symmetrieachse. Mathematisch lässt sich dieses Resultat als Diagonalisierung der Streumatrix des Mechanismus beschreiben, wobei die Argumente der Rotationsmatrizen wiederum der Orientierung der Symmetrieachse entsprechen. Bei der Umsetzung der Änderung der Polarisationsbasis durch eine unitäre Transformation ergibt sich somit eine einzelne Vorzugspolarisation, welche die Leistung des Störers minimiert. Im Fall mehrerer Störsignale kann die unitäre Transformation als Filterbank ausgeführt werden, wodurch mehrere Nullstellen für verschiedene Störer erzeugt werden können [125].

Für den Fall eines zufälligen Polarisationszustand des Störers, wurden zudem Verfahren zur Unterdrückung teilweise oder diffus polarisierter Signale entwickelt. Beim Fall teilweise polarisierter Wellen wird eine zusätzliche Schätzung des Anteils

des Signals ohne Vorzugspolarisation eingeführt und die Leistung der gewünschten und zeitlich stabilen Signalkomponente maximiert [126–128].

Praktische Bedeutung besitzt die polarimetrische Filterung bzw. die Ausrichtung der Polarisationsbasis für die Kontrastoptimierung polarimetrischer Daten im Bildbereich sowie der Unterdrückung ungewünschter Signale im Fall schmalbandiger Systeme [129, 130]. Je nach Freiheitsgrad und Anwendungsbereich kann jedoch häufig nur eine Seite des Systems für die Optimierung herangezogen werden. Für alle messtechnischen Aufgaben in dieser Arbeit, welche keine Echtzeitfähigkeit benötigen, werden sämtliche Filterungen und Berechnung auf die bereits in einer beliebigen orthogonalen Basis aufgezeichneten Radar-Daten angewendet. Konkrete Optimierungen des Polarisationszustands der Antennen um bspw. den Dynamikbereich des Messsystems optimal auszusteuern, waren nicht Ziel der Arbeit. Dennoch stellt das Konzept der polarimetrischen Filterung eine grundlegende Verarbeitungsmethodik zur Verfügung, welche nachfolgend genutzt wird.

### 4.2.2. Überblick des Verfahrens

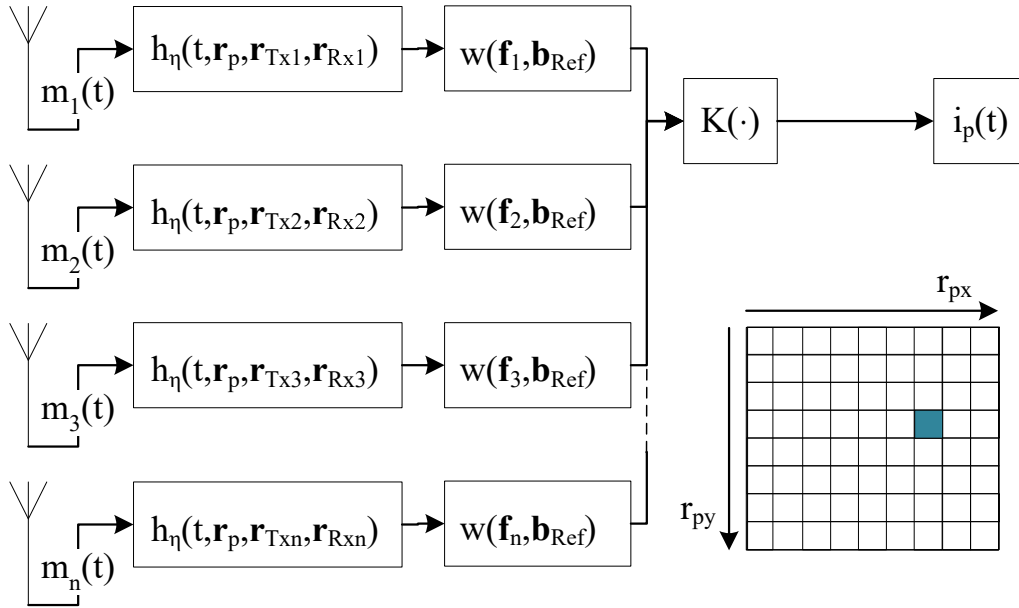
Das Konzept der Wahl einer für das Problem optimalen Polarisationsbasis ist gleichbedeutend mit der Projektion eines Signals in die jeweilige Basis. Die in Abschnitt 2.3.2 eingeführte Pauli-Zerlegung nutzt dieses Konzept auf einfache Weise. Bezieht man die Pauli-Koeffizienten auf die in [129] vorgestellte Filterung mittels gewichteter Kombination orthogonaler Sensorsignale am Empfänger, so entsprechen die gewählten Gewichte von  $\Phi$ - und  $\Theta$ -Komponente den Elementen auf der Hauptdiagonalen der Pauli-Matrix  $\sigma_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ . In diesem Fall kann die schwache Rückstreuung eines Dipols, welcher mit einem Wandmechanismus überlagert wird, aus dem Empfangssignal extrahiert werden, da sich die gleichphasigen kopolaren Komponenten des Wandmechanismus auslöschen.

Im Allgemeinen nehmen konventionelle Zerlegungsverfahren eine Zuordnung gemessener Streumechanismen zu kanonischen und damit idealisierten Rückstreuobjekten vor. Reale Messdaten enthalten jedoch immer lediglich gewisse Anteile kanonischer Komponenten, wodurch eine vollständige Unterdrückung störender Signalanteile vor der eigentlichen Bildgebung erschwert wird.

Aus diesem Grund wurden in [117, 118] Verfahren präsentiert, welche unter Kenntnis der Streumatrizen  $\mathbf{S}_1$  und  $\mathbf{S}_2$  eine Unterscheidung der Streumechanismen durch Selektion der dazugehörigen Entfernungszellen der Radar-Daten vornehmen. Ziel dieser Selektion ist die Auswahl ungestörter Entfernungszellen, welche eine kohärente Integration durch den nachfolgenden Bildgebungsalgorithmus ermöglichen. Dabei werden zwei Merkmalsvektoren  $\mathbf{S}_1 \rightarrow \mathbf{f}_1$  und  $\mathbf{S}_2 \rightarrow \mathbf{f}_2$  definiert, welche die zu unterscheidenden polarimetrischen Informationen enthalten. Eine ideale Projektion dieser Vektoren auf einen Referenzvektor  $\mathbf{b}_{Ref}$ , welcher als Basis-

vektor der Orthogonalprojektion dient, ist abgeleitet von der Maximierung des Abstands der projizierten Punkte auf den Vektor. Die resultierenden skalaren Faktoren oder Gewichte dienen anschließend der Detektion der jeweiligen Mechanismen.

Abbildung 4.5 veranschaulicht den letztendlichen Einfluss auf den Bildgebungsalgorithmus. Wurden die Gewichtsfunktionen  $w$  bei modellbasierten Verfahren anhand geometrischer Parameter ( $\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_n$ ) gewählt, so findet im Fall der polarimetrischen Separierung eine Unterdrückung der nicht zum gewünschten Muster ähnlichen Merkmalsvektoren statt.



**Abbildung 4.5.:** Blockschaltbild bildgebender Signalverarbeitung mit polarimetrischer Datenselektion: Die Wichtungsfunktion  $w$  ist abhängig vom Ergebnis der Projektion des Merkmalsvektors der Entfernungszelle  $\mathbf{f}_n(t)$  auf den Referenzvektor  $\mathbf{b}_{Ref}$ .

### 4.2.3. Projektion des Datenraums

Der Merkmalsvektor bildet die polarimetrische Signatur einer Entfernungszelle in den zugrundeliegenden  $N$ -dimensionalen Merkmalsraum ab. Damit bilden alle Entfernungszellen eines gemeinsamen Streumechanismus Stichproben einer multivariaten Verteilung in Form eines Zufallsvektors  $\mathbf{F}^{(M)} = (F^{(M1)}, \dots, F^{(MN)})$  mit  $N$  Zufallsvariablen, welche die Randverteilungen der Komponenten des Merkmalsvektors bezeichnen. Die Gesamtheit der Radar-Daten ergibt sich damit als Überlagerung verschiedener Verteilungen von  $M$  Rückstreueobjekten und einem Rauschvektor  $\mathbf{F}^{(0)}$  zu einer Mischverteilung  $\mathcal{F} = \mathbf{F}^{(0)} \cap \mathbf{F}^{(1)} \cap \dots \cap \mathbf{F}^{(M)}$ . Die Dichte  $p_{\mathcal{F}}(f_1, \dots, f_N)$  definiert dabei die  $N$ -dimensionale Auftretenswahrscheinlichkeit der

Komponenten des Merkmalsvektors. Im allgemeinen bistatischen Fall ergibt sich gemäß Gleichung 4.3 ein Merkmalsvektor  $\mathbf{f}$  bestehend aus Elementen der polarimetrischen Kovarianzmatrix von Radar-Entfernungszellen  $\mathbf{C}$  nach Gleichung 2.29, wobei nur  $N = 10$  Elemente von  $\mathbf{C}$  aufgrund der Symmetriebedingungen nutzbare Informationen enthalten.

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} S_{\Phi\Phi}S_{\Phi\Phi} & S_{\Phi\Phi}S_{\Phi\Theta} & S_{\Phi\Phi}S_{\Theta\Phi} & S_{\Phi\Phi}S_{\Theta\Theta} & S_{\Phi\Theta}S_{\Phi\Theta} \\ S_{\Phi\Theta}S_{\Theta\Phi} & S_{\Phi\Theta}S_{\Theta\Theta} & S_{\Theta\Phi}S_{\Theta\Phi} & S_{\Theta\Phi}S_{\Theta\Theta} & S_{\Theta\Theta}S_{\Theta\Theta} \end{bmatrix}^T \quad (4.3)$$

### Orthogonalprojektion

Nach Gleichung 4.4 ergibt das innere Produkt aus Merkmalsvektor  $\mathbf{f}$  und Basisvektor  $\mathbf{b}_{Ref}$  eine Orthogonalprojektion der polarimetrischen Signatur von  $\mathbf{f}$  auf einen Punkt  $b$   $\mathbf{b}_{Ref}$ , wobei  $b$  die Distanz von Projektionspunkt und Ursprung definiert. Somit bewirkt  $g_b$  eine Dimensionsreduktion  $\mathbb{R}^{10} \rightarrow \mathbb{R}^1$  mit der resultierenden Zufallsgröße nach Gleichung 4.5.

$$g_b := b = \mathbf{b}_{Ref}^H \cdot \mathbf{f} \quad (4.4)$$

$$B(b) = g_b(\mathbf{F}(f_1, \dots, f_{10})) \quad (4.5)$$

Für die Gewichtung der Entfernungszellen mithilfe des in Abbildung 4.5 gekennzeichneten Fensterfunktion  $w(t) = w(\mathbf{f}, \mathbf{b}_{Ref})$  ergibt sich nach Gleichung 4.4 ein binäres Entscheidungsproblem zur Separierung verschiedener Streumechanismen anhand eines Schwellwerts  $\chi$  gemäß Gleichung 4.6.

$$w(\mathbf{f}, \mathbf{b}_{Ref}) = \begin{cases} 1, & b \leq \chi \\ 0, & b > \chi \end{cases} \quad (4.6)$$

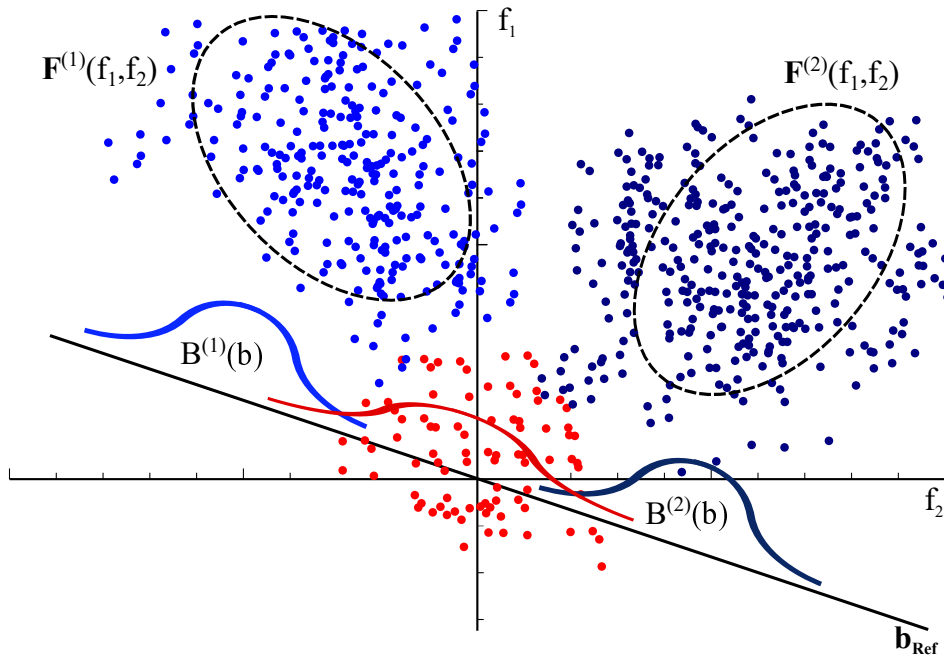
Der Schwellwert wird dabei unter Vernachlässigung des Rauschvektors entsprechend einer minimierten Wahrscheinlichkeit der Fehldetektion nach Gleichung 4.7 definiert.

$$\chi = \arg \left( \min \left( \int_{\chi}^{\infty} p_{B(1)}(b)db + \int_{-\infty}^{\chi} p_{B(2)}(b)db \right) \right) \quad (4.7)$$

Diese Berechnung benötigt die Kenntnis der Dichten der projizierten Merkmalsvektoren der zu unterscheidenden Signaturen. In Algorithmus 1 wird eine vereinfachte alternative Schätzung gegeben, falls  $p_{B(1)}$  oder  $p_{B(2)}$  unbekannt sind.

### Wahl des Basisvektors

Zielstellung der Dimensionsreduktion ist die optimale Unterscheidung zwei vordefinierter Merkmalsvektoren  $\mathbf{S}_1 \rightarrow \mathbf{f}_1$  und  $\mathbf{S}_2 \rightarrow \mathbf{f}_2$ , welche Entfernungszellen der



**Abbildung 4.6.:** Veranschaulichung der Projektion der Merkmalsvektoren: Jeder Punkt im Datenraum repräsentiert den Merkmalsvektor einer Entfernungszelle. Die zu unterscheidenden Mechanismen sind in hell- und dunkelblau gekennzeichnet. Rote Entfernungszellen beinhalten lediglich Rauschen. Die Orthogonalprojektion der Merkmalsvektoren auf  $\mathbf{b}_{Ref}$  transformiert die multivariate Verteilung in ein binäres Entscheidungsproblem.

Radar-Daten repräsentieren. Gemäß Gleichung 4.7 wird der Ausdruck der Fehldektionswahrscheinlichkeit zu Null im Fall  $B^{(1)} \cap B^{(2)} = \emptyset$ . Dazu sollte die Distanz zwischen den Stichproben von  $B^{(1)}$  und  $B^{(2)}$  nach Gleichung 4.8 maximiert werden.

$$\mathbf{b}_{Ref} = \arg(\max(d(b_1 \mathbf{b}_{Ref}, b_2 \mathbf{b}_{Ref}))) \quad (4.8)$$

Falls beide Rückstreumechanismen ähnliche Leistung besitzen ergibt sich die triviale Lösung für eine maximale Distanz mit

$$\mathbf{b}_{Ref}^{(d)} = \frac{\mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_2}{|\mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_2|}. \quad (4.9)$$

Bei der Unterscheidung schwacher Rückstreukomponenten von dominanten Mechanismen sollte jedoch als Nebenbedingung ein unteres Limit für  $b_1$  oder  $b_2$  definiert werden. Dabei würde das mittlere  $b_1$  maximiert werden falls  $\mathbf{b}_{Ref} = \mathbf{f}_1$ . Allgemein ergibt sich der Referenzvektor damit zur Selektion des ersten Rückstreume-

chanismus gemäß Gleichung 4.10 mit  $k = \frac{\|\mathbf{S}_1\|}{\|\mathbf{S}_2\|}$ .

$$\mathbf{b}_{Ref}^{(1)} = (1 - k) \mathbf{f}_1 + k \mathbf{b}_{Ref}^{(d)} \quad (4.10)$$

#### 4.2.4. Integration in bildgebende Signalverarbeitung

Die in Abbildung 4.2 dargestellten synthetisierten Radar-Daten enthalten drei dominante Streumechanismen  $\mathbf{S}^{(1)}$  bis  $\mathbf{S}^{(4)}$  gemäß Gleichung 4.11, wobei der Zylindermechanismus aufgrund des positionsbedingten Projektionseffekts, wie in Tabelle 4.2 gezeigt, in zwei unterschiedlichen Formen auftritt.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}^{(1)} &= m_S^{(1)} \mathbf{S}_{tri} \\ \mathbf{S}^{(2)} &= m_S^{(2)} \mathbf{S}_{dih}(0^\circ) \\ \mathbf{S}^{(3)} &= m_S^{(3)} \mathbf{S}_{zyl}(45^\circ) \\ \mathbf{S}^{(4)} &= m_S^{(4)} \mathbf{S}_{zyl}(-45^\circ) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Als Zielstellung gilt die Unterscheidung der jeweiligen polarimetrischen Signaturen in den Entfernungszellen der Radar-Daten  $M_{\{\Phi, \Theta\}}(\mathbf{r}, t)$ , wodurch eine Zerlegung in vier Komponenten  $M_{\{\Phi, \Theta\}}^{(1)}$  bis  $M_{\{\Phi, \Theta\}}^{(4)}$  erfolgt. Diese werden zur anschließenden Transformation in den Bildbereich  $I_{\{\Phi, \Theta\}}^{(1)}$  bis  $I_{\{\Phi, \Theta\}}^{(4)}$  genutzt.

---

#### Algorithmus 1 Bildgebung nach Merkmalsdetektion

---

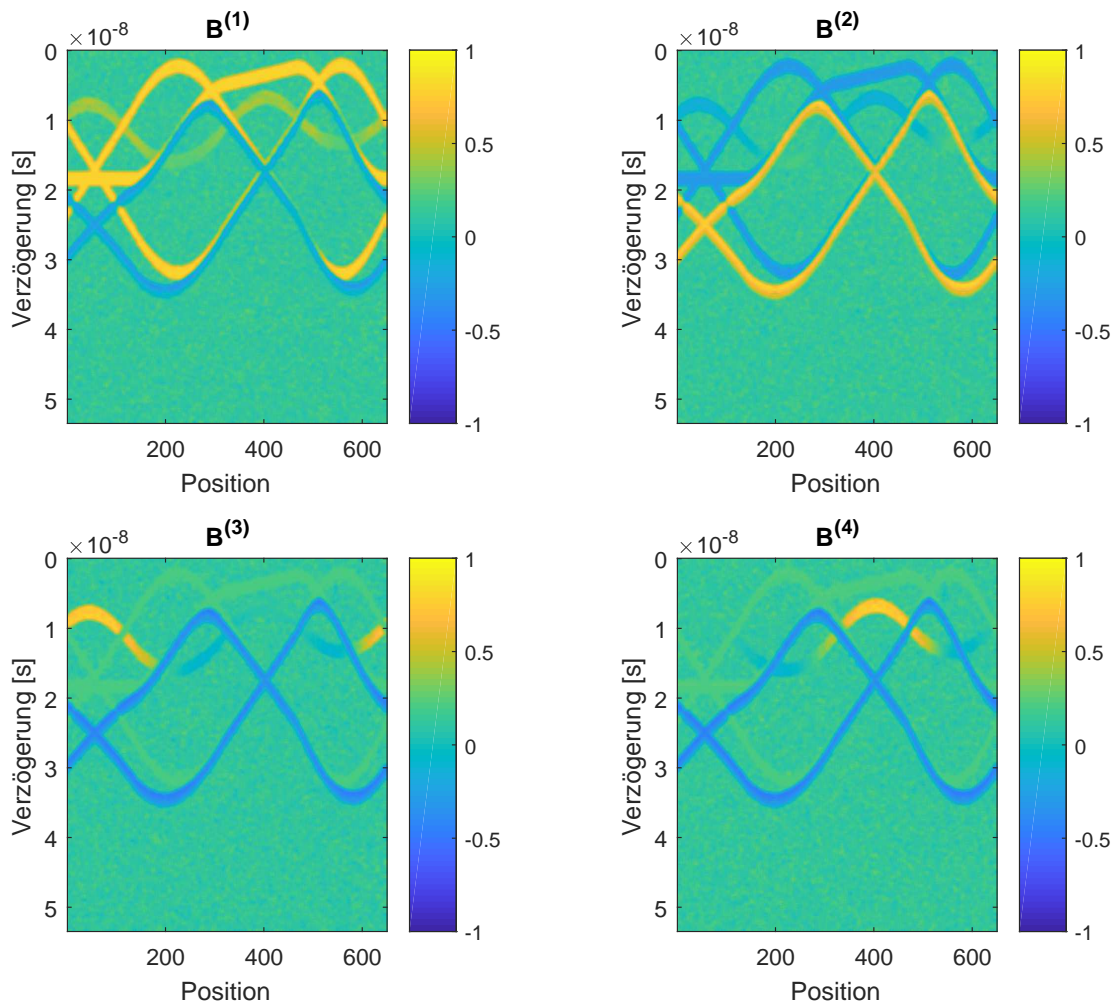
<b>Input:</b> $\mathbf{S}^{(1)}, \mathbf{S}^{(2)}, \mathbf{M}$	▸ Signaturen von Ziel- und Störobjekt, Radar-Daten
<b>Output:</b> $\mathbf{I}_{\{\Phi, \Theta\}}^{(1)}$	▸ polarimetrische Bilddaten mit separiertem Zielobjekt
----- ▸ <b>Bestimmung des Referenzvektors</b>	
$\mathbf{S}_1 \rightarrow \mathbf{f}_1, \mathbf{S}_2 \rightarrow \mathbf{f}_2$	▸ Merkmalsvektoren nach (4.3)
Bestimmung von $\mathbf{b}_{Ref}$	▸ Referenzvektor nach (4.10)
Berechnung von $b_1, b_2$	▸ Distanzen nach (4.4)
Bestimmung von $\chi = \frac{b_1 + b_2}{2}$	▸ Detektorschwellwert ohne Kenntnis der Dichten
----- ▸ <b>Zerlegung der Daten</b>	
<b>for all</b> $\mathbf{S}$ <b>in</b> $\mathbf{M}$ <b>do</b>	▸ Für jede Entfernungszelle
$\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{f}$	▸ Merkmalsvektor nach (4.3)
Berechnung von $b$ als Element von $\mathbf{B}$	▸ Projektionsdistanz nach (4.4)
Berechnung von $w$ als Element von $\mathbf{W}$	▸ Wichtungselement nach (4.6)
<b>end for</b>	
Berechnung von $\mathbf{M}^{(1)} = \mathbf{M} \circ \mathbf{W}$	▸ Gewichtung der Radar-Daten,
Hadamard-Produkt $\circ$	
$\mathbf{M}^{(1)} \rightarrow \mathbf{I}_{\{\Phi, \Theta\}}^{(1)}$	▸ Bildgebung nach (3.7)

---



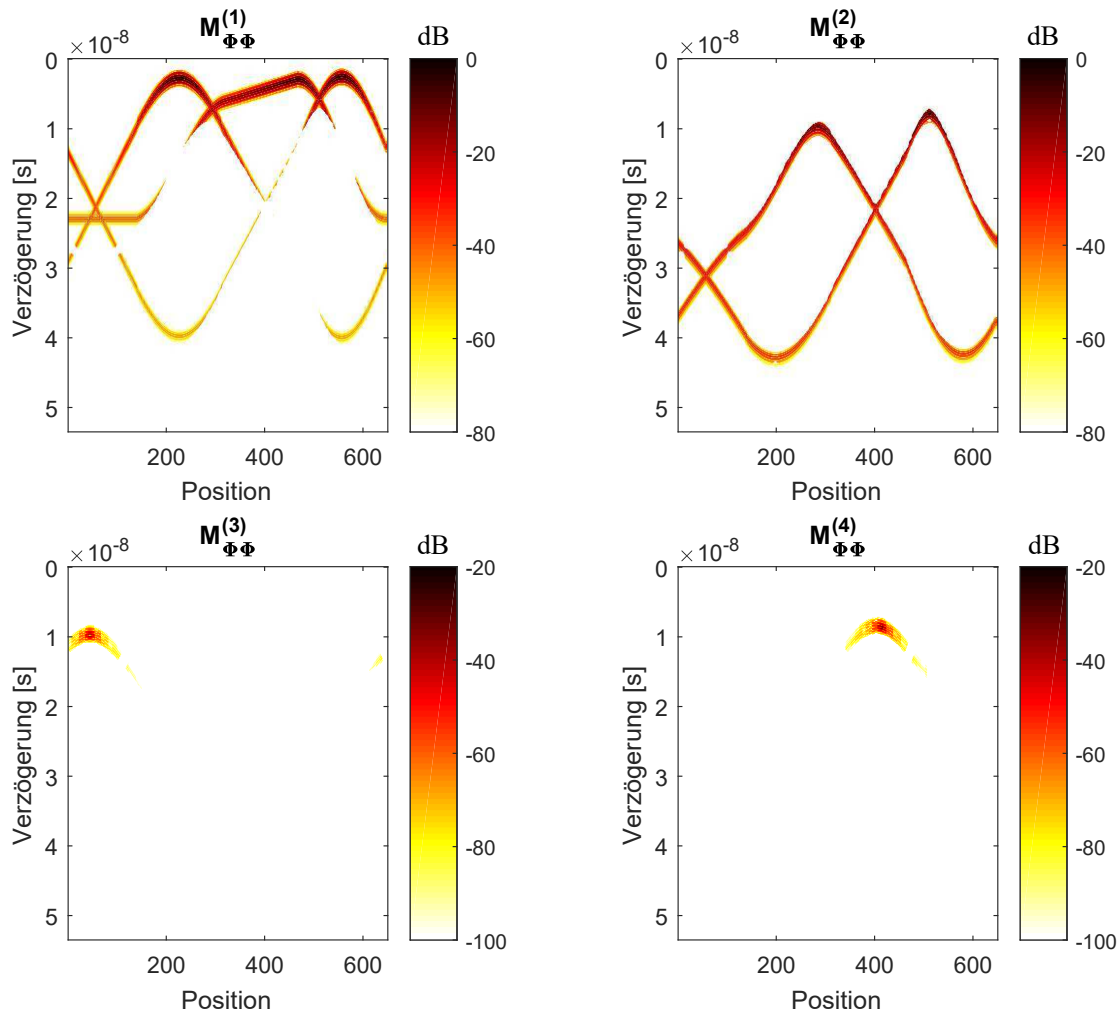
Zur Reduzierung der Abbildungen werden in diesem Kapitel lediglich die kopularen Komponenten der Mess- und Bildbereichsdaten dargestellt. Eine vollständige Übersicht aller polarimetrischen Komponenten kann Abschnitt B entnommen werden.

### 4.2.5. Resultate und Diskussion



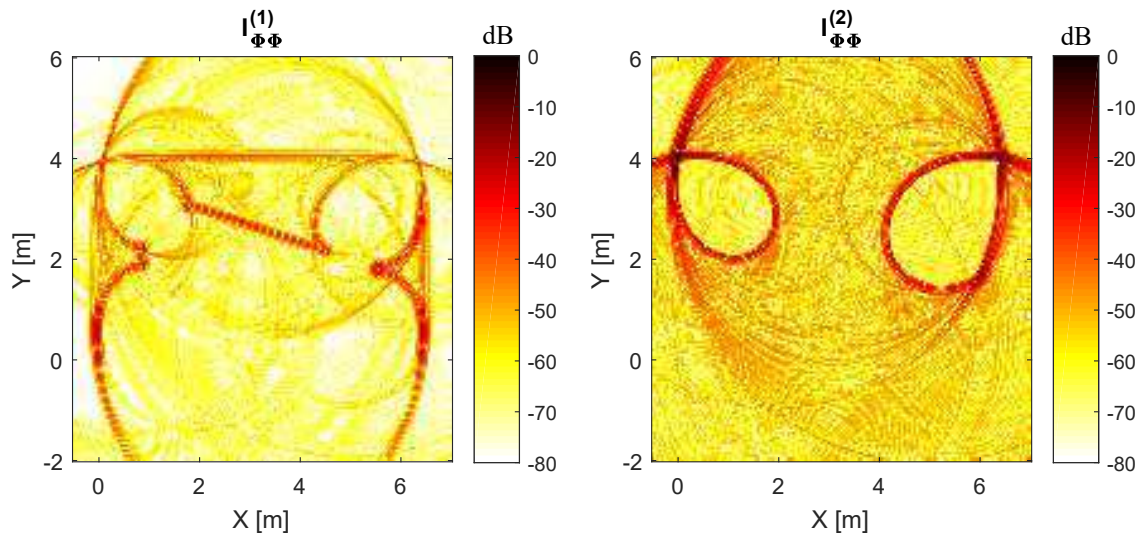
**Abbildung 4.7.:** Projektionsergebnisse der polarimetrischen Signaturen: Jede Abbildung zeigt die Projektion der Radar-Daten auf unterschiedliche Basisvektoren, welche einer anschließenden Detektion der jeweiligen Entfernungszellen für ungeradzahlige (1), geradzahlige (2) Reflexionen und zwei Aspektwinkel des Dipoles (3)&(4) dienen.

Abbildung 4.7 zeigt die Projektion der Radar-Daten auf die jeweiligen Basisvektoren. Die Optimierung verschiedener Vektoren zur Unterscheidung von jeweils zwei Mechanismen führt zu einer Maximierung der Differenz der Magnituden der ausgewählten Objekte. So werden bspw. in  $\mathbf{B}^{(1)}$  die Entfernungszellen, welche einen Mechanismus mit ungeradzahlgiger Reflexion beinhalten maximiert, Zellen mit geradzahlgigen Reflexionen jedoch minimiert. Dadurch liegen beide Verteilung in möglichst großer Distanz voneinander im Merkmalsraum und können anschließend mit dem Schwellwert  $\chi = 0$  detektiert werden.



**Abbildung 4.8.:** Kopolare Simulationsdaten nach Detektion der Einzelmechanismen für ungeradzahlgige (1), geradzahlgige (2) Reflexionen und zwei Aspektwinkel des Stabs (3) & (4). In  $\mathbf{M}_{\Phi\Phi}^{(3)}$  und  $\mathbf{M}_{\Phi\Phi}^{(4)}$  ändert sich auf Grund des Aspektwinkels die polarimetrische Signatur des Objekts, wodurch zwei verschiedene Mechanismen detektiert werden.

Somit bieten die in  $\mathbf{B}^{(1)}$  bis  $\mathbf{B}^{(4)}$  gezeigten Ergebnisse eine Zerlegung der Radar-Daten in eine nicht-orthogonale Basis. Daraus folgt im Gegensatz zu konventionellen kohärenten Verfahren wie der Pauli- oder Krogager-Zerlegung, dass eine Rekonstruktion der ursprünglichen Radar-Daten als Linearkombination der einzelnen Zerlegungskomponenten nicht möglich ist. Weiterhin bietet eine einzelne Zerlegung lediglich die Unterscheidung von zwei Mechanismen. Zur Separierung von  $N$  Mechanismen voneinander müssen demnach  $N/2(N-1)$  Basisvektoren aufgestellt werden. Durch logische Verknüpfung der separaten Detektionsergebnisse kann somit ein Entscheidungsbaum mit  $N-1$  Ebenen aufgebaut werden. Als Ergebnis der

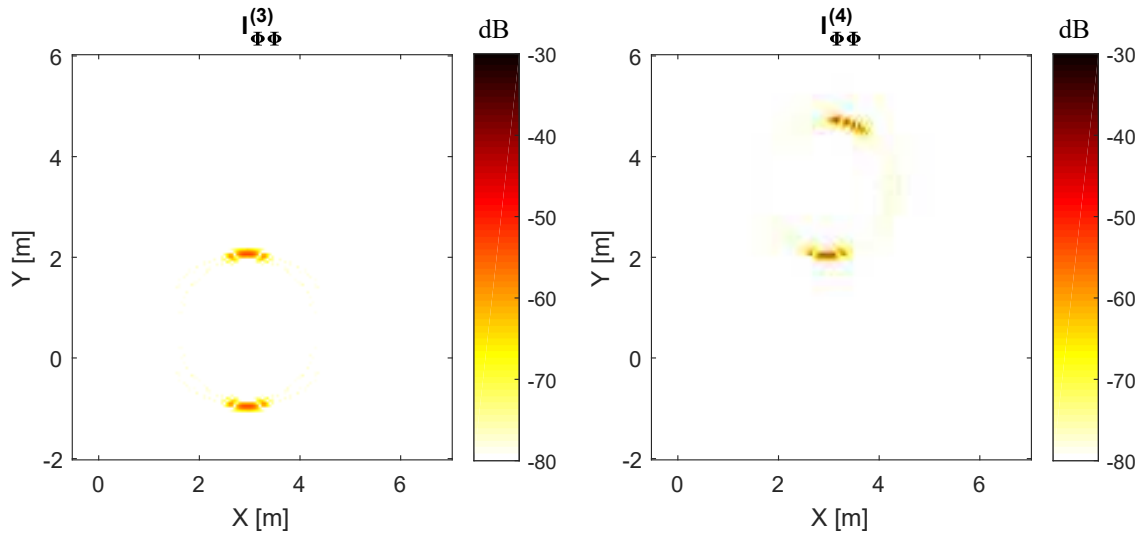


**Abbildung 4.9.:** Kopolares Bildgebungsresultat nach Wichtung der Zeitbereichsdaten:  $\mathbf{I}_{\Phi\Phi}^{(1)}$  zeigt den Bildbereich nach Detektion des polarimetrischen Mechanismus für ungeradzahlige Reflexionen in den Zeitbereichsdaten.  $\mathbf{I}_{\Phi\Phi}^{(2)}$  zeigt den Bildbereich für den polarimetrischen Mechanismus geradzahliger Reflexionen.

Zerlegung der Zeitbereichsdaten zeigt Abbildung 4.8 die kopolaren Komponenten der Radar-Daten nach der Separierung der einzelnen Mechanismen. Diese Untermengen der Radar-Daten werden anschließend für ein herkömmliches Bildgebungsverfahren genutzt. Da die Gesamtanzahl der Rückstreukomponenten jedoch im Zeitbereich auf ähnliche polarimetrische Mechanismen begrenzt wurde, wird eine Reduzierung von Artefakten und Fehlabbildungen angestrebt. Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10 zeigen jeweils die kopolaren Bildbereichskomponenten der zuvor separierten Radar-Daten. Die dominanten Mechanismen der geradzahligen Reflexionen der Ecken des Raumes sowie die ungeradzahligen Reflexionen der Wände

lassen sich in den Bildbereichen  $\mathbf{I}_{\Phi\Phi}^{(1)}$  und  $\mathbf{I}_{\Phi\Phi}^{(2)}$  mit hoher Güte trennen. Das deutliche Maß an Mehrdeutigkeiten kann jedoch durch die Ausnutzung polarimetrischer Informationen nicht reduziert werden, da diese aufgrund der Mehrdeutigkeit des inversen Problems in Bezug auf die Messpositionen und die Ausdehnung der Objekte hervorgerufen werden.

Besonders deutlich wird der Nutzen des Zerlegungsverfahrens bei den schwachen Mechanismen in  $\mathbf{I}_{\Phi\Phi}^{(3)}$  und  $\mathbf{I}_{\Phi\Phi}^{(4)}$ . Aufgrund der nicht auflösbaren Mehrdeutigkeit werden zwei räumliche Bereiche hoher Intensität abgebildet, wobei lediglich im Zentrum der Abbildung ein Objekt vorhanden ist. Aufgrund der Lage der Spiegelung des Objekts an der geradlinigen Anordnung der Sensorpositionen, lässt sich jedoch im Bildbereich feststellen, dass der polarimetrische Mechanismus durch die Änderung des Aspektwinkels zum Sensor seine Form maßgeblich verändert. Die genauen Streumatrizen von ausgewählten Datenpunkten im Zeit- und Bildbereich sind in Tabelle 4.3 nochmals aufgeführt.



**Abbildung 4.10.:** Kopolares Bildgebungsresultat nach Wichtung der Zeitbereichsdaten:  $\mathbf{I}_{\Phi\Phi}^{(3)}$  zeigt den Bildbereich nach Detektion des Dipolmechanismus. Aufgrund des Aspektwinkels ändert sich die polarimetrische Signatur des Objekts, wobei nur der untere bzw. obere Bewegungspfad zur einer Detektion führt (s. Abbildung 4.8).

Der direkte Vergleich zwischen herkömmlicher polarimetrischer Analyse im Bildbereich und der vorgestellten Zerlegung der Radar-Daten im Zeitbereich verdeutlicht, dass eine Ausnutzung der hohen Bandbreite eines Radar-Sensors eine sinnvolle Extraktion polarimetrischer Eigenschaften vor der eigentlichen Bildgebung ermöglicht. Diese Informationen können zur Reduzierung von Bildartefakten

und Fehlabbildungen für die anschließende Transformation genutzt werden und dienen ebenfalls zur Berücksichtigung von Projektionseffekten, die eine Interpretierbarkeit der Bildbereichsdaten erschweren. Schmalbandige Systeme können aufgrund der fehlenden Separierbarkeit der Streumechanismen im Zeitbereich keine kohärente Zerlegung oder Selektion der Radar-Daten im Zeitbereich vornehmen. Besonders am Beispiel des geeigneten Stabes, zeigt sich zudem, dass eine nachträgliche Kompensation der fehlerhaften Überlagerung der Radar-Daten im Bildbereich nach erfolgter Integration nicht möglich ist und die Information des Streumechanismus irreversibel verfälscht wird.

**Tabelle 4.3.:** Normierte Streumatrizen im Vergleich: Die angegebenen Verzögerungszeiten, Messpositionen und X-Y-Positionen beziehen sich auf exemplarische Teile der Zeit- und Bildbereichsdaten in Abbildung 4.2 und Abbildung B.1 bis Abbildung B.4.

Objekt	Bildbereich		Zeitbereich		
	Bezeichnung	[X, Y] [m]    Streumatrix	$\tau$ [ns]	Pos.	Streumatrix
linke Ecke	[0.0, 4.0]	$\begin{bmatrix} 0.74 & 0 \\ 0 & -0.67 \end{bmatrix}$	11	290	$\begin{bmatrix} 0.72 & 0 \\ 0 & -0.70 \end{bmatrix}$
rechte Ecke	[6.5, 4.0]	$\begin{bmatrix} 0.72 & 0 \\ 0 & -0.70 \end{bmatrix}$	8.5	515	$\begin{bmatrix} 0.72 & 0 \\ 0 & -0.70 \end{bmatrix}$
. Wand 1	[0.0, 0.5]	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$	3	230	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$
Wand 2	[3.0, 4.0]	$\begin{bmatrix} 0.73 & 0 \\ 0 & 0.68 \end{bmatrix}$	5.5	400	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$
Wand 3	[6.5, 0.5]	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$	3	460	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$
Stab (1)	[3.0, 2.0]	$\begin{bmatrix} 0.46 & 0.54 \\ 0.54 & 0.44 \end{bmatrix}$	9	420	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.51 & 0.49 \end{bmatrix}$
Stab (2)	[3.0, 2.0]	$\begin{bmatrix} 0.47 & -0.54 \\ -0.54 & 0.45 \end{bmatrix}$	10	50	$\begin{bmatrix} 0.47 & -0.53 \\ -0.53 & 0.47 \end{bmatrix}$

Das eingeführte Verfahren der Merkmalsdetektion dient der somit Identifikation von Entfernungszellen anhand der Ähnlichkeit ihrer polarimetrischen Signatur. Es besteht die Annahme, dass eine ungestörte kohärente Integration der Daten durch bildgebende Verfahren vorliegt, wenn die Signatur und damit die Wellenform im Integrationsfenster konstant bleibt. Durch die Detektion der entsprechenden Entfernungszellen wird damit eine Verfälschung des Streumechanismus durch den Bildgebungsalgorithmus verhindert. Dabei beruht die Methode lediglich auf Selektion der Radar-Daten im Zeitbereich, wodurch sie unabhängig von nachstehenden Bildgebungsverfahren bzgl. verschiedener Objektmodelle wie Punkstreuung oder flächigen Objekten ist. Bei der Orthogonalprojektion der Entfernungszellen auf den Basisvektor werden dementsprechend alle Entfernungszellen gleichartig verarbeitet. Eine Nutzung der Metainformationen der Radar-Daten wie Messposition oder Verzögerung der Rückstreukomponente werden nicht berücksichtigt. Nachteilig am vorgestellten Vorgehen zeigt sich die Beschränkung auf eine mögliche Unterscheidung von lediglich zwei polarimetrische Signaturen je Referenzvektor. Zudem müssen die Signaturen als vorab bekannt angenommen werden, wobei diese Bedingung besonders für schwache Rückstreukomponenten ein Problem darstellt.

### 4.3. Iterative Verbundzerlegung von Zeit- und Bildbereichsdaten

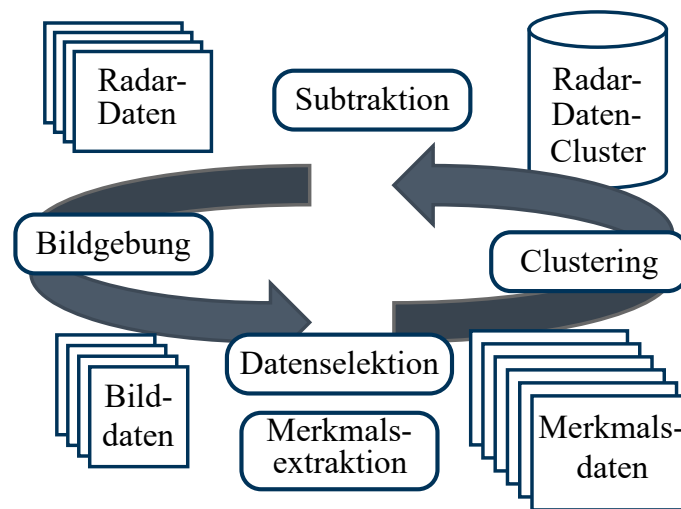
Das zuvor eingeführte Verfahren der Merkmalsdetektion wertet die Gesamtheit der Entfernungszellen der Radar-Daten anhand vorgegebener polarimetrischer Signaturen aus, indem die durchgeführte Orthogonalprojektion auf einen Referenzvektor eine Rückführung des multivariat verteilten Problems auf eine binäre Detektion bestimmter Merkmale zurückführt. Schwache Rückstreumechanismen, welche durch dominantere Komponenten maskiert werden, können somit sehr einfach für die Auswertung verloren gehen, sofern diese Wissen a priori nicht zur Verfügung steht. Die durch das Verfahren genutzten Informationen beschränken sich zudem lediglich auf die polarimetrischen Radar-Daten im Zeitbereich, wobei sämtliche Metainformationen und die resultierenden Bildgebungsresultate nicht in die Detektion einfließen. Dennoch bietet der Ansatz der Separierung von Entfernungszellen ähnlicher polarimetrischer Signatur einen guten Ausgangspunkt zur Erhöhung der Interpretierbarkeit von Bildgebungsresultaten.

Das bereits in Unterabschnitt 4.2.3 eingeführte statistische Modell der Radar-Daten beschreibt alle Entfernungszellen anhand ihrer Merkmalsvektoren als Datenpunkte im Merkmalsraum, welche anhand einer multivariaten Mischverteilung modelliert werden. Ähnliche polarimetrische Signaturen verschiedener Punkte be-

sitzen eine räumliche Nähe im Merkmalsraum und können somit als gemeinsamer Cluster mit bestimmter Verteilung beschrieben werden. Anzahl und Lage der Cluster sind zunächst unbekannt und sollen mittels statistischer Auswertung in Form einer Clusteranalyse bestimmt werden. Je nach Öffnungswinkel der Antennen und der Zusammensetzung der Umgebung ist eine Schätzung der zu erwartenden Anzahl an Clustern in der Gesamtheit der Radar-Daten nur mit einer großen Unsicherheit möglich. Da dieser Parameter jedoch eine signifikante Bedeutung für die Genauigkeit unüberwachter Klassifikationsverfahren besitzt, ist ein einmaliges Verarbeiten aller Radar-Daten nicht sinnvoll. Die Lage der Cluster im Merkmalsraum bildet die Form des polarimetrischen Mechanismus bzw. die Signatur der Rückstreuung ab.

#### 4.3.1. Überblick des Verfahrens

In [120] wurde ein iteratives Verfahren präsentiert, welches polarimetrische Signaturen der Radar-Daten schrittweise im Zeit- und Bildbereich miteinander verknüpft und durch Anwendung des Expectation-Maximization-Algorithmus (EM) eine Schätzung der Parameter der zugrundeliegenden Gauß'sche Mischverteilung (GMM) durchführt.



**Abbildung 4.11.:** Iterative Zeit- und Bildbereichszerlegung: Mit jeder Iteration werden dominante Rückstreukomponenten im Bildbereich detektiert und die zugrundeliegenden Entfernungszellen der Radar-Daten ausgewählt. Nach Transformation dieser Daten in den Merkmalsraum, kategorisiert ein Clustering-Verfahren den Streumechanismus der Entfernungszelle und zieht diese von den Radar-Daten ab. Im Zeitbereich trennbare Mechanismen werden damit in den Radar-Daten separiert und eine Überlagerung verschiedener Mechanismen im Bildbereich verhindert.



Das in Abbildung 4.11 veranschaulichte Vorgehen zeigt die einzelnen Schritte des vorgeschlagenen Verfahrens. In jedem Iterationsschritt werden die Radar-Daten mittels eines Bildgebungsverfahrens aus Abschnitt 3.2 in den Bildbereich transformiert. Über eine anschließende Detektion und Lokalisierung der dominantesten Rückstreuung findet eine inverse Identifikation der Entfernungszellen im Zeitbereich statt, welche zum detektierten Pixel beigetragen haben. Diese stark reduzierte Datenmenge wird nach einer Transformation in den Merkmalsraum mittels Clusteranalyse untersucht, wobei der dominanteste Cluster in einer Datenbank abgelegt und aus den ursprünglichen Daten entfernt wird. Nähert sich die Energie der verbliebenen Radar-Daten dem Rauschniveau an, wird mithilfe eines Abbruchkriteriums eine Beendigung nach der Iteration durchgeführt.

In Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13 sind die zugrundeliegenden Verarbeitungsschritte der Zeit- und Bildbereichsdaten schematisch dargestellt. Die farbliche Kennzeichnung am rechten Rand jeder Darstellung weist auf den Ursprung der Daten aus Zeit- oder Bildbereich hin. Es folgt in den nächsten Abschnitten eine detaillierte Darstellung der einzelnen Verarbeitungsschritte.

### 4.3.2. Lokalisierung des Streumechanismus

Zur Initialisierung eines Iterationsschrittes werden zuvor ermittelte Radargramme mittels eines der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Verfahren in den Bildbereich  $\mathbf{M}_{\Phi, \Theta} \rightarrow \mathbf{I}_{\Phi, \Theta}$  transformiert. Die Wahl des Verfahrens entscheidet über die zu fokussierenden Objektkategorien, wobei im Folgenden lediglich Punktstreuer im Bildbereich in Betracht gezogen werden. Durch die Anwendung modellbasierter Verfahren besteht jedoch grundsätzlich die Möglichkeit eine Abbildung flächiger oder ausgedehnter Objekte vorzunehmen und für den weiteren Prozess zu verwenden.

Für die einzelnen polarimetrischen Kanäle ergeben sich somit Einzelabbildung, welche anschließend analog zur klassischen UWB-Radar-Bildgebung zu einer skalaren Intensitätsverteilung  $I(r_{px}, r_{py}) = \sqrt{\sum |I_{\{\Phi, \Theta\}}|^2}$  gemäß Gleichung 3.8 zusammengeführt werden. Vergleichbar mit den in Abbildung 4.3 dargestellten Ergebnissen weist dieses initiale Radar-Bild zahlreiche Bildartefakte und Mehrdeutigkeiten auf. Für dominante Rückstreuobjekte, welche dem Objektmodell des Bildgebungsverfahrens entsprechen, werden sich jedoch räumliche Bereiche mit erhöhter Intensität herausbilden. Die Position höchster Intensität wird gemäß Gleichung 4.12 lokalisiert und dient der Selektion der zugehörigen Entfernungszellen in den Radar-Daten.

$$\hat{\mathbf{r}}_p = [\hat{r}_{px} \ \hat{r}_{py}]^T = \arg \left[ \max \left( I(r_{px}, r_{py}) \right) \right] \quad (4.12)$$



### 4.3.3. Datenselektion im Zeitbereich

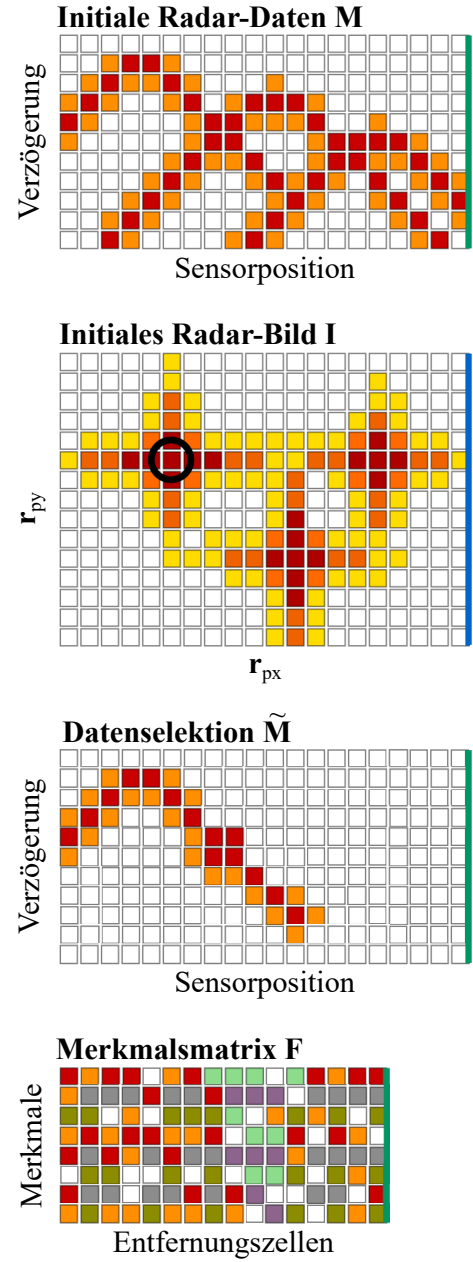
Eine Auswahl der Entfernungszellen, welche zur Intensität eines Pixels beitragen, verringert die mögliche Anzahl sich überlagernder Streumechanismen für eine nachfolgende Analyse auf eine geringe Anzahl an Clustern. Diese Selektion ist eng verbunden mit dem zuvor verwendeten Bildgebungsverfahren, da eine Identifikation der zugehörigen Entfernungszellen der Radar-Daten über die in Gleichung 3.5 eingeführte Bildgebungsfunktion ermöglicht wird. Zur Erhaltung einzelner Sensorsignale entfällt lediglich die Integration über alle Messpositionen, wodurch sich unter Verwendung einer Rechteckfunktion mit bestimmter Breite als Fensterfunktion  $w(t)$  nach Gleichung 4.13 eine Selektion von Radar-Daten  $\tilde{\mathbf{M}}$  ergibt.

$$\tilde{\mathbf{M}}(\mathbf{r}, t) = w(t) \left( m_n(t) * h(t, \hat{\mathbf{r}}_p, \mathbf{r}_{Tx}, \mathbf{r}_{Rx}) \right) \rightarrow \tilde{\mathbf{M}} \quad (4.13)$$

Je nach Breite der Fensterfunktion werden je Sensorsignal  $N$  Entfernungszellen selektiert, wodurch sich eine Datenmatrix  $\tilde{\mathbf{M}}_{\{\Phi, \Theta\}} \in \mathbb{R}^{(N \times P)}$  für  $P$  Messpositionen ergibt.

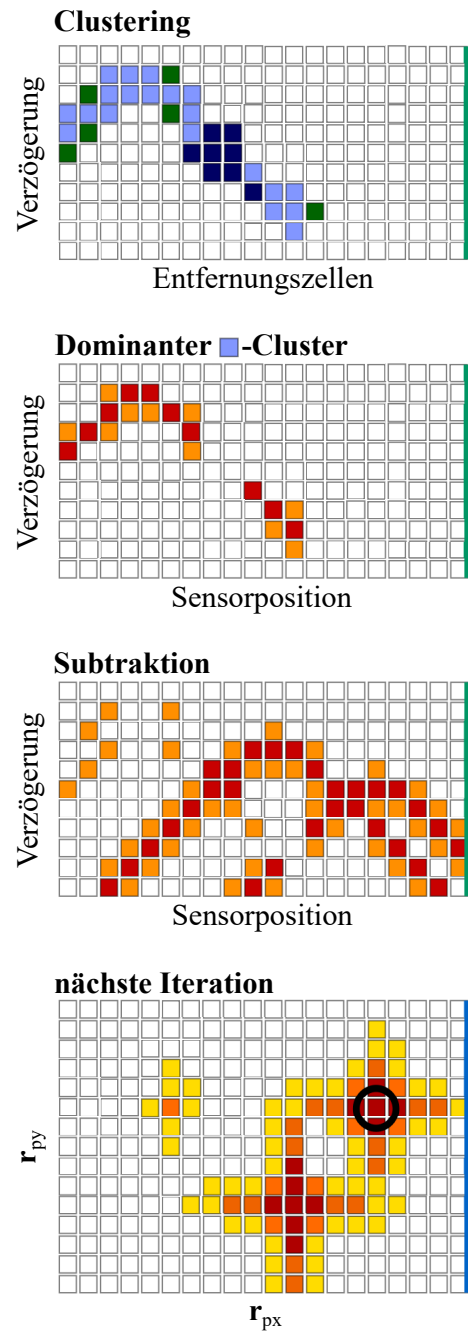
### 4.3.4. Modellierung des Merkmalsraums und Clustering

$\tilde{\mathbf{M}}$  enthält somit die Streumatrizen der ausgewählten  $M = N \times P$  Entfernungszellen, welche anschließend mithilfe des in Gleichung 4.3 eingeführten Merkmalsvektors in eine Merkmalsmatrix  $\tilde{\mathbf{M}} \rightarrow \mathbf{F} \in \mathbb{R}^{(10 \times M)}$  überführt werden. Diese enthält die polarimetrischen Signaturen der Radar-Daten in Form der Elemente der Kovarianzmatrix.



**Abbildung 4.12.:** Schematischer Ablauf der Zeit- (grün) und Bildbereichsverarbeitung (blau) [Teil 1] - Nach der Lokalisierung der höchsten Intensität im Bildbereich, dienen die zugehörigen Entfernungszellen der Merkmalsextraktion im Zeitbereich.

Aufgrund der Vorselektion der Radar-Daten durch die Lokalisierung der dominantesten Rückstreuung im Bildbereich ergeben sich Grundannahmen für die Ähnlichkeit der Spaltenvektoren bzw. Merkmalsvektoren in  $F$ . Eine große Anzahl der Entfernungszellen wird eine ähnliche polarimetrische Signatur aufweisen, da sonst keine kohärente Integration im Bildbereich erfolgt wäre. Weiterhin werden einige Entfernungszellen aufgrund von Abschattung des Sensors oder der Breite der angewendeten Fensterfunktion lediglich Rauschen beinhalten. Je nach Anzahl vorhandener Rückstreuobjekte und unerwünschter Überlagerungen werden einige Entfernungszellen Signaturen mit geringer Ähnlichkeit aufweisen. Zur Identifikation der einzelnen Gruppen wird deshalb eine unüberwachte Klassifikation der Daten vorgenommen. Durch statistische Modellierung der Daten der Merkmalsmatrix als multivariate Mischverteilung lassen sich die einzelnen Streumechanismen als ursächliche Zufallsprozesse definieren. Zielstellung der Modellierung ist die Gruppierung der zugrundeliegenden Entfernungszellen der Zeitbereichsdaten anhand ihrer polarimetrischen Eigenschaften. Die durchzuführende Schätzung der Parameter der Verteilungen der Streumechanismen dient lediglich zur Klassifikation der Zellen nach dem dominantesten Mechanismus, nicht aber zur hochauflösenden Schätzung aller vorhandener Überlagerungen. Dieses Vorgehen ist durch die spätere Verwendung der Zeitbereichsdaten in einem Bildgebungsprozess motiviert, wobei die Separierung der Daten nach Clustern zu einer Reduzierung von Bildartefakten und geringer verfälschten polarimetrischen Signaturen im Bildbereich führt. Dies wird erreicht durch die Abbildung des dominantesten Clusters und Analyse des Bildbereichs.



**Abbildung 4.13.:** Schematischer Ablauf der Zeit- (grün) und Bildbereichsverarbeitung (blau) [Teil 2] - Mittels Clustering der Merkmalsdaten werden die Entfernungszellen mit hoher Ähnlichkeit selektiert und von den Radar-Daten subtrahiert.

Die Wahl der statistischen Modellierung und des entsprechenden Clusterings der Daten orientiert sich an den Annahmen zu den Marginalverteilungen der multivariaten Mischverteilung. Es kann davon ausgegangen werden, dass die absoluten Beträge der Werte der Spalten der Merkmalsmatrix deutlich von der Entfernung zwischen Sensor und Pixel abhängig sind, da sich die Leistungsabnahme eines ein- und ausfallenden Signals jeweils quadratisch zur Distanz darstellt. Dementsprechend ist eine Leistungsnormierung der zugrundeliegenden Streumatrizen sinnvoll, um im Datenraum kompakt vorliegende Cluster zu gewährleisten. Es kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Dimensionen teilweise starke Korrelationen aufweisen. Diese Korrelation ist dabei maßgeblich von den Eigenschaften des beleuchteten Objekts abhängig. Betrachtet man eine Streumatrix, welche nur zufälliges Rauschen beinhaltet sind deren Elemente statistisch unabhängig voneinander. Korrespondiert die Entfernungszelle mit der Rückstreuung einer Wand besteht zwischen beiden kopolaren Komponenten eine positive Korrelation. Im Gegensatz dazu liegt bei einer Doppelreflexion eine negative Korrelation der Komponenten vor.

Sämtliche Clustering Verfahren für schwach- oder unkorrelierte Merkmalsdaten wie bspw. k-Means, welches die Cluster als Voronoi-Zellen um die Cluster-Zentren modelliert, sind daher für das vorliegende Problem ungeeignet. Grad der Korrelation und Ausprägung des Merkmalsvektors hängen deutlich vom unbekannten beleuchteten Objekt ab, wodurch als möglichst flexible und gleichzeitig berechnungseffiziente Modellierung eine gemäß Gleichung 4.14 beschriebene Gauß'sche Mischverteilung der Parameter  $\Gamma = \{k_1 \cdots k_K, \boldsymbol{\mu}_1 \cdots \boldsymbol{\mu}_K, \boldsymbol{\Sigma}_1 \cdots \boldsymbol{\Sigma}_K\}$  angenommen wird [131].

$$p_F(\mathbf{f}|\Gamma) = \sum_{i=1}^K k_i \mathcal{N}_d(\mathbf{f}|\boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i) \quad (4.14)$$

Jede der  $K$  Komponenten der Mischverteilung wird demnach als multivariate Normalverteilung mit Mittelwerten  $\boldsymbol{\mu} \in \mathbb{R}^{d \times 1}$  und Kovarianzmatrix  $\boldsymbol{\Sigma} \in \mathbb{R}^{d \times d}$  nach Gleichung 4.15 beschrieben und erhält zudem eine spezifische Wichtung  $k_i$  der Mischverteilung (hier:  $d = 10$ , Länge des Merkmalsvektors).

$$\mathcal{N}_d(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^d |\boldsymbol{\Sigma}|}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{f}-\boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{f}-\boldsymbol{\mu})} \quad (4.15)$$

Zur Schätzung der Verteilungsparameter  $\{k_i, \boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i\}$  findet dabei der *Expectation-Maximization*-Algorithmus (EM) Anwendung [132]. Auf Grundlage der beobachteten Stichproben der Merkmalsmatrix  $\mathbf{F}$  bestimmt dieses iterative Verfahren deren a-posteriori Verteilungsparameter durch schrittweise Annäherung an den wahrscheinlichsten Satz an Parametern und ist somit ein Maximum-Likelihood Verfahren.

Neben den Datenpunkten benötigt das Verfahren weiterhin die Anzahl an Clustern  $K$ . Durch die vorherige Selektion der Entfernungszellen anhand der maximalen Intensität im Bildbereich, wird die Anzahl an potentiellen Rückstreukomponenten auf  $3 \leq K \leq 10$  begrenzt. Unter der Annahme, dass einige Zellen lediglich Rauschen, einen dominanten Streumechanismus und mindestens eine ungewollte Überlagerung beinhalten, ergibt sich dadurch die untere Grenze. Je nach Anzahl von Rückstreueobjekten in der Umgebung können sich noch einige zusätzliche Rückstreumechanismen überlagern, wodurch sich die obere Grenze ergibt.

Tendenziell ist eine zu hohe Wahl der Anzahl an Clustern nicht nachteilig für das Ergebnis, sofern ähnliche Cluster nachträglich wieder zusammengeführt werden. Dazu wird ein Ähnlichkeitskriterium  $\alpha$  als normierter Abstand der Cluster-Zentren im Parameterraum nach Gleichung 4.16 definiert.

$$\alpha(\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\mu}_2) = \frac{\boldsymbol{\mu}_1^T \boldsymbol{\mu}_2}{\|\boldsymbol{\mu}_1\| \|\boldsymbol{\mu}_2\|} \quad (4.16)$$

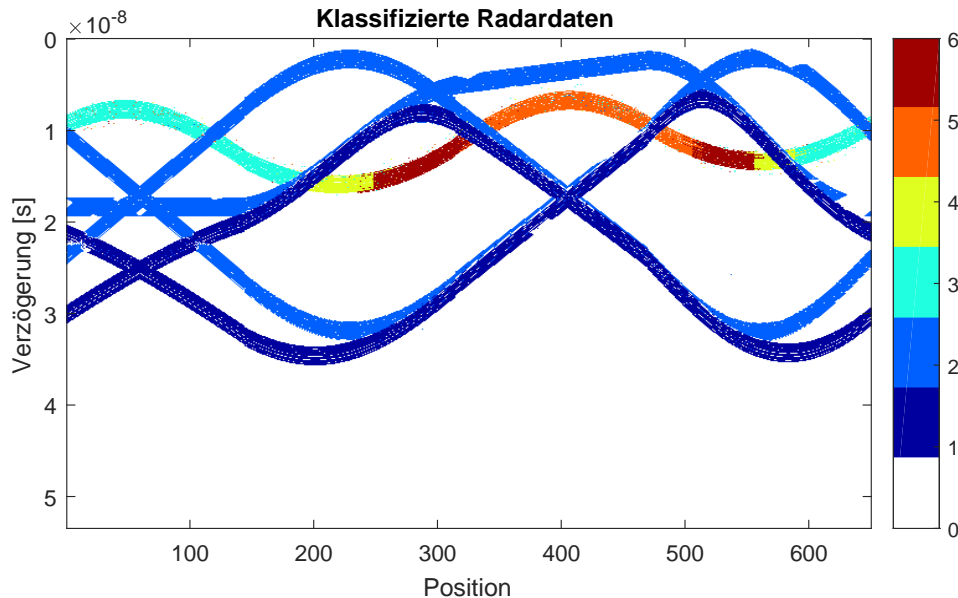
Cluster  $\mathcal{C}_1$  und  $\mathcal{C}_2$  sind demnach ähnlich und können vereint werden wenn  $\alpha(\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\mu}_2)$  kleiner als ein zu definierender normierter Abstand ist.

#### 4.3.5. Abbruchbedingung und Zerlegungsergebnis

Mit jedem Iterationsschritt findet eine Zuordnung von Entfernungszellen ähnlicher polarimetrischer Mechanismen zu Clustern statt. Der Cluster, welcher die größte Energie der Entfernungszellen auf sich vereint wird am Ende jeder Iteration als dominantester Cluster selektiert und entsprechend der zugehörigen Entfernungszellen von den verbliebenen Radar-Daten subtrahiert. Auf diese Weise sinkt der Anteil rückgestreuter Signalkomponenten im Zeit- und Bildbereich bis lediglich Rauschkomponenten enthalten sind. In diesem Fall ist eine Lokalisierung der maximalen Intensität im Bildbereich nicht möglich und die Iteration wird abgebrochen. Das Ergebnis von  $N$  Iterationsschritten besteht somit aus  $N$  Clustern, welche eine Kollektion von Entfernungszellen enthalten und durch deren Verteilungsparameter bestimmt sind. Weiterhin stehen die zugehörigen Lokalisierungsergebnisse des Bildbereichs als räumliche Zuordnung zur Verfügung.

Abbildung 4.14 zeigt die Ergebnisse der Zerlegung, wobei Cluster mit ähnlicher Rückstreusignatur und unterschiedlicher räumlicher Zuordnung in Gruppen zusammengefasst wurden. In der zugrundeliegenden Simulationsumgebung wurden mit Wänden, Ecken und einem gedrehten Stab in der Mitte des Raumes drei verschiedene Rückstreueobjekte platziert. Das Resultat der Zerlegung liefert 6 unterschiedliche Clustergruppen, wobei die überwiegende Mehrheit der Entfernungszellen der dominanteren Mechanismen der geradzahligen und ungeradzahligen Reflexionen an Wänden und Ecken korrekt in einzelnen Clustern zusammengeführt

wurde. Aufgrund der Projektionseffekte des Zylindermechanismus liefert das Clu-

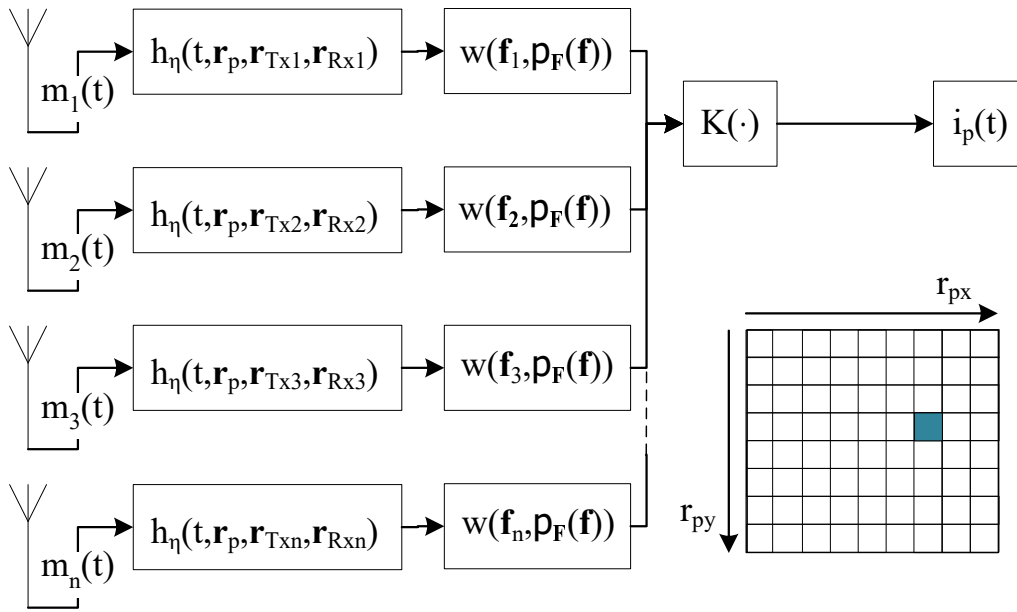


**Abbildung 4.14.:** Nach deren Ähnlichkeit zusammengefasste Gruppen von Clustern der Radar-Daten: Cluster (0) kennzeichnet nicht klassifizierte oder aufgrund geringer Clustergröße aussortierte Entfernungszellen. Alle sonstigen Entfernungszellen wurden nach der Ähnlichkeit des Streumechanismus im Merkmalsraum zu 6 Gruppen zusammengefasst: (1) - geradzahlige Reflexion, (2) - ungeradzahlige Reflexion, (3)-(6) Dipolmechanismus in verschiedenen Projektionen.

stering der Rückstreukomponenten vier unterschiedliche Cluster, wobei Cluster (3) und (5) mit den Ergebnissen der Merkmalsdetektion in Abbildung 4.8 korrespondieren. Die zugehörigen kreuzpolaren Komponenten der Streumatrix ändern aufgrund des geänderten Aspektwinkels das Vorzeichen. Mit Cluster (4) und (6) liefert das iterative Verfahren sogar die energetisch schwächste Projektion des Mechanismus in die  $\Theta$ -Orientierung des Sensors. Eine detaillierte Beschreibung der Bild- und Zeitbereichsresultate wird in Tabelle 4.4 vorgestellt.

#### 4.3.6. Integration in bildgebende Signalverarbeitung

Für das resultierende Bildgebungsverfahren ergibt sich gemäß Abbildung 4.15 die Gewichtung der Entfernungszellen der Sensoren nach der Zugehörigkeit zu einem Cluster.



**Abbildung 4.15.:** Blockdiagramm bildgebender Signalverarbeitung mit Cluster-basierter Datenselektion: Die Wichtungsfunktion  $w$  ist abhängig von der Zugehörigkeit einer Entfernungszelle zu einem bestimmten Cluster.

Dazu kann die Fensterfunktion  $w(\mathbf{f}_n, \mathbf{p}_F(\mathbf{f}))$  unter Kenntnis der geschätzten Mischverteilung und des Merkmalsvektors der Entfernungszelle als die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit der Entfernungszelle  $n$  zu einem Cluster  $\mathcal{C}_i$  nach Gleichung 4.17 berechnet werden, wobei im Sinn bedingter Wahrscheinlichkeitsdichten bei disjunkten Clustern der Satz von Bayes direkt angewendet werden kann [133].

$$w_i(\mathbf{f}_n, \mathbf{p}_F(\mathbf{f})) = p(\mathcal{C}_i | \mathbf{f}_n, \mathbf{\Gamma}) = \frac{k_{\mathcal{C}_i} \mathcal{N}_d(\mathbf{f}_n | \boldsymbol{\mu}_{\mathcal{C}_i}, \boldsymbol{\Sigma}_{\mathcal{C}_i})}{\sum_{m=1}^K k_{\mathcal{C}_m} \mathcal{N}_d(\mathbf{f}_n | \boldsymbol{\mu}_{\mathcal{C}_m}, \boldsymbol{\Sigma}_{\mathcal{C}_m})} \quad (4.17)$$

Damit findet analog zum zuvor eingeführten Verfahren der Merkmalsdetektion eine Separierung der Radar-Daten in Gruppen ähnlicher polarimetrischer Signatur statt. Die geschätzten Cluster repräsentieren im idealen Fall eine hierarchische Strukturierung der Daten nach vorkommenden Rückstreueobjekten. Im Gegensatz zur reinen Merkmalsdetektion sind hier die einzelnen Komponenten der Radar-Daten nicht nur nach polarimetrischen Eigenschaften sondern auch nach Lokalisierung im Bildbereich und bei Anwendung verschiedener modellbasierter Bildgebungsverfahren nach Rückstreumodell aufgelöst. Algorithmus 2 zeigt dabei die Zusammenfassung der einzelnen Verarbeitungsschritte.

---

**Algorithmus 2** Iterative Zeit- und Bildbereichszerlegung

---

**Input:**  $\mathbf{M}$  ▷ Radar-Daten  
**Output:**  $\mathcal{C}_1 \cdots \mathcal{C}_N, \mathbf{I}_{\{\Phi, \Theta\}}^{(1 \cdots N)}$  ▷ Cluster 1 bis  $N$  und zugehörige Bildbereiche  


---

  
**while** 1 **do**  
     $\mathbf{M}_{\{\Phi, \Theta\}} \rightarrow \mathbf{I}_{\{\Phi, \Theta\}}$  ▷ Bildgebung nach (3.7)  
     $\hat{\mathbf{I}} \leftarrow \sqrt{\sum |\mathbf{I}_{\{\Phi, \Theta\}}|^2}$  ▷ Gesamtintensität nach (3.8)  
    **if**  $\max\{\hat{\mathbf{I}}\} < \chi$  **then** ▷ Maximale Intensität kleiner als Schwellwert  
        Unterbreche Schleife  
    **else**  
        Fortfahren  
    **end if**  
    Bestimmung von  $\hat{\mathbf{r}}_p$  ▷ Position maximaler Intensität nach (4.12)  
    Datenselektion  $\mathbf{M} \xrightarrow{\hat{\mathbf{r}}_p} \tilde{\mathbf{M}}$  ▷ nach (4.13)  
    **for all**  $\mathbf{S}$  **in**  $\tilde{\mathbf{M}}$  **do** ▷ Für jede Entfernungszelle  
         $\tilde{\mathbf{S}} \leftarrow \frac{\mathbf{S}}{\|\mathbf{S}\|}$  ▷ Energienormierung  
         $\mathbf{f} \leftarrow \tilde{\mathbf{S}}$  ▷ Merkmalsvektor nach (4.3)  
    **end for** ▷  $\tilde{\mathbf{M}} \rightarrow \mathbf{F} \in \mathbb{R}^{(10 \times M)}$  Abbildung der Datenselektion in Merkmalsraum  
     $\mathbf{F} \rightarrow \{\mathcal{C}_1 \cdots \mathcal{C}_K\}$  ▷ Bestimme  $K$  Cluster  
     $\{\mathcal{C}_1 \cdots \mathcal{C}_K\} \rightarrow \{\mathcal{C}_1 \cdots \mathcal{C}_L\}$  ▷ Zusammenführung ähnlicher Cluster  
     $\mathcal{C}_n \leftarrow \max\{\mathcal{C}_1 \cdots \mathcal{C}_L\}$  ▷ Auswahl dominantester Cluster, Speicherung  
    Berechnung  $\mathbf{W}^{(n)}$  ▷ Wahrscheinlichkeit der Cluster-Zugehörigkeit nach (4.17)  
     $\mathbf{M}_{\{\Phi, \Theta\}} \leftarrow \mathbf{M}_{\{\Phi, \Theta\}} - (\mathbf{S} \in \mathcal{C}_n)$  ▷ Subtraktion zugehöriger Entfernungszellen  
**end while**  


---

  
    Berechnung  $\mathbf{M}^{(n)} = \mathbf{M} \circ \mathbf{W}^{(n)}$  ▷ Gewichtete Radar-Daten, Hadamard-Produkt  $\circ$   
     $\mathbf{M}^{(n)} \rightarrow \mathbf{I}_{\{\Phi, \Theta\}}^{(n)}$  ▷ Bildgebung nach (3.7)  

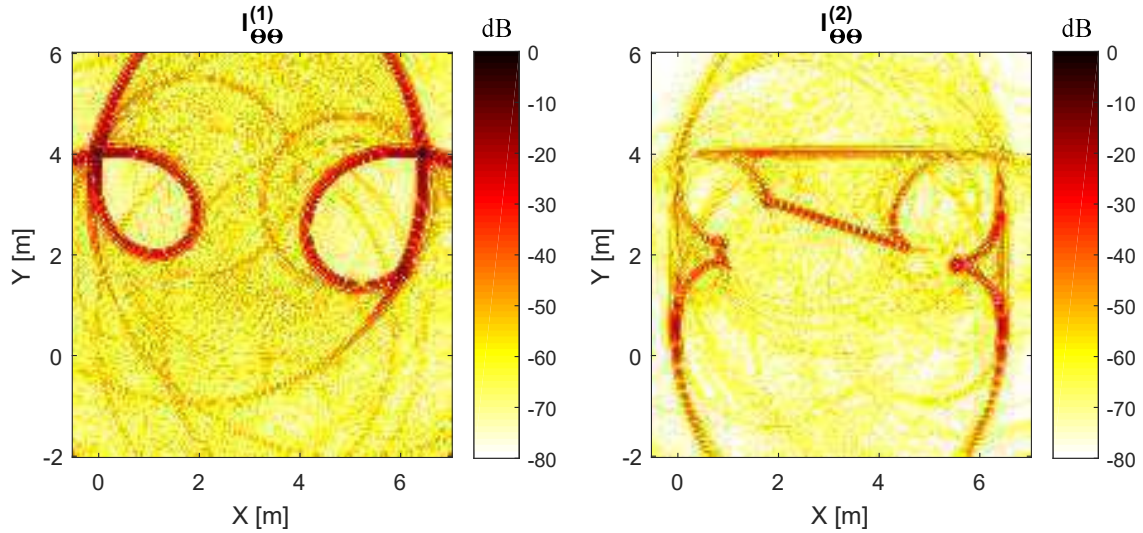

---

### 4.3.7. Resultate und Diskussion

Wie bereits aus den resultierenden Cluster-Gruppen in Abbildung 4.14 ersichtlich wurde, kann die Mehrzahl der vorkommenden Streumechanismen der Umgebung bereits in den Zeitbereichsdaten unterschieden werden. Durch entsprechende Bildgebung der gewichteten Radar-Daten ergeben sich die in Abbildung 4.16 und 4.17 dargestellten Bildbereiche der zugehörigen sechs Cluster-Gruppen. Die Cluster stellen dabei nicht-orthogonale Basiskomponenten der Rückstreuung dar, wodurch in einem spezifischen Szenario trainierte Cluster-Parameter nicht ohne Wei-



teres auf beliebige andere Szenarien übertragen werden können. Damit lässt sich das vorgestellte iterative Verfahren als *Offline*-Verfahren bezeichnen, da zur Schätzung einer vorliegenden Mischverteilung zunächst eine gewisse Menge an Radar-Daten gegeben sein muss.

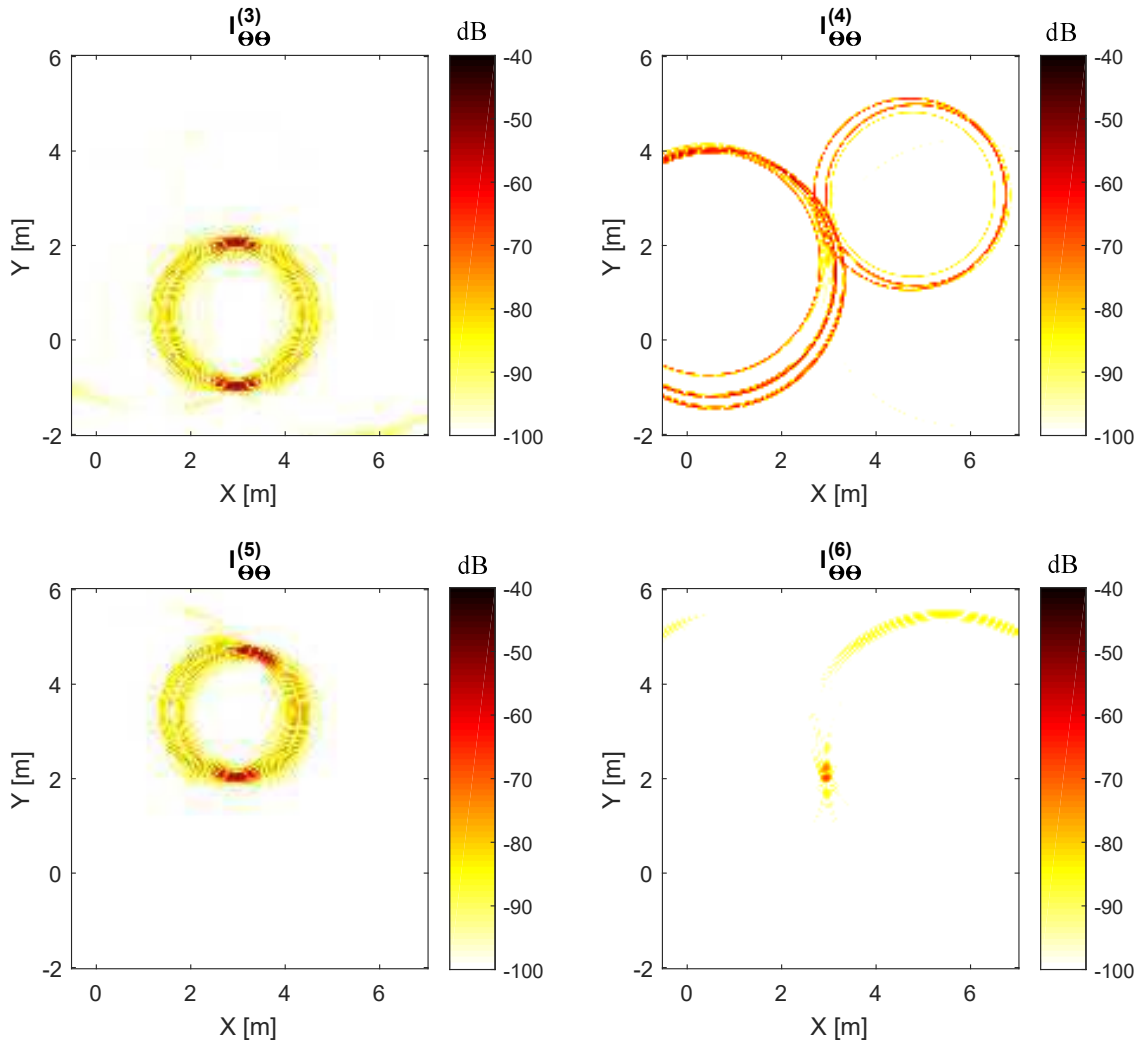


**Abbildung 4.16.:** Kopolares Bildgebungsresultat nach Gruppierung ähnlicher Cluster:  $I_{\Theta\Theta}^{(1)}$  zeigt den Bildbereich der Cluster-Gruppe geradzähliger Reflexionen,  $I_{\Theta\Theta}^{(2)}$  entsprechend die ungeradzähligen Reflexionen. Die Nummerierung entspricht der Kennzeichnung der Cluster aus Abbildung 4.14.

Weiterhin ergibt sich aus dem Charakter unüberwachter Klassifikationsverfahren eine zusätzliche Fragestellung der Zuordnung der resultierende Cluster zu tatsächlichen Rückstreumechanismen. Das Zustandekommen eines Clusters oder einer Cluster-Gruppe begründet sich auf der Ähnlichkeit der Radar-Daten im Merkmalsraum, welcher im vorgestellten Verfahren iterativ in Einzelkomponenten zerlegt wird. Dabei wird die Reihenfolge zunächst durch die lokalisierte maximale Intensität im Bildbereich festgelegt und unterliegt somit keiner sofortigen Zuordnung zu erwarteten Resultaten wie es bspw. bei einer kohärenten Zerlegung in Basismatrizen oder auch beim Verfahren der Merkmalsdetektion der Fall wäre.

Zur Herstellung einer Assoziation der Zerlegungsergebnisse aus Unterabschnitt 4.2.2 mit den in diesem Abschnitt gezeigten Ergebnissen, wird eine zusätzliche Analyse der mittleren Signatur der Cluster bzw. des Bildbereichs nötig. Analog zu den bereits gezeigten Ergebnissen der Merkmalsdetektion, stellt die Trennung der dominanten Rückstreukomponenten von Ecken und Wänden auch für die Zeit- und Bildbereichszerlegung eine realisierbare Aufgabe dar. Ein deutli-





**Abbildung 4.17.:** Kopolares Bildgebungsresultat für die verschiedenen Projektionen des Dipol-Mechanismus.  $I_{\Theta\Theta}^{(3)}$  und  $I_{\Theta\Theta}^{(5)}$  korrespondieren mit der in Abbildung 4.10 gezeigten Projektion auf die Messpositionen oberhalb und unterhalb des Ziels. Die nochmals schwächere Projektion des Stabes als vertikales Objekt in der Sende-Empfangsebene kann durch das iterative Clustering-Verfahren in  $I_{\Theta\Theta}^{(4)}$  und  $I_{\Theta\Theta}^{(6)}$  abgebildet werden.

Die Steigerung der Interpretierbarkeit zeigt sich bei der Analyse der schwächeren Rückstreukomponenten des gedrehten Stabes. Da durch die Hinzunahme der Lokalisierungsinformation aus dem Bildbereich auch winkelabhängige Signaturen aufgelöst werden können, wird eine Unterscheidung der Projektionen des Stabes in die verschiedenen Sensorpositionen ermöglicht.

Wie aus Tabelle 4.4 ersichtlich wird, können für die Ecken und Wände des Raumes normierte Streumatrizen extrahiert werden, welche den idealen Signaturen nahe kommen. Die verschiedenen Projektionen des Stabs können im Vergleich zur Merkmalsdetektion noch deutlicher zerlegt werden. In (1) und (2) sind die bereits zuvor detailliert beschriebenen Projektionen gezeigt, welche von Sensorpositionen oberhalb und unterhalb des Objekts beobachtbar sind. (3) und (4) hingegen kennzeichnen sehr schwache Rückstreukomponenten von Sensorpositionen links und rechts des gedrehten Stab. In diesen Fällen wird das Objekt als rein vertikal in die Sende-Empfangsebene projiziert. Je nach Positionierung des Sensors leicht oberhalb oder unterhalb der Ebene erscheinen die kreuzpolarisierten Komponenten mit unterschiedlichen Vorzeichen. Diese leichte Änderung der Signatur war für das iterative Verfahren ausreichend zwei verschiedene hauptsächlich vertikal polarisierte Signaturen zu unterscheiden. Zudem ergeben sich durch den unsymmetrischen Bewegungspfad des Sensor im Raum unterschiedliche Überlagerungen mit anderen Rückstreukomponenten, was sich besonders im Unterschied der Bildbereiche  $\mathbf{I}_{\Theta\Theta}^{(4)}$  und  $\mathbf{I}_{\Theta\Theta}^{(6)}$  zeigt.

**Tabelle 4.4.:** Normierte Streumatrizen im Vergleich: Die angegebenen Verzögerungszeiten, Messpositionen und X-Y-Positionen beziehen sich auf exemplarische Teile der Zeit- und Bildbereichsdaten in Abbildung 4.2 und Abbildung B.9 bis Abbildung B.14.

Objekt	Bildbereich		Zeitbereich		
	Bezeichnung	[X, Y] [m]    Streumatrix	$\tau$ [ns]	Pos.	Streumatrix
linke Ecke	[0.0, 4.0]	$\begin{bmatrix} 0.74 & 0 \\ 0 & -0.68 \end{bmatrix}$	11	290	$\begin{bmatrix} 0.72 & 0 \\ 0 & -0.70 \end{bmatrix}$
rechte Ecke	[6.5, 4.0]	$\begin{bmatrix} 0.71 & 0 \\ 0 & -0.70 \end{bmatrix}$	8.5	515	$\begin{bmatrix} 0.72 & 0 \\ 0 & -0.70 \end{bmatrix}$
. Wand 1	[0.0, 0.5]	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$	3	230	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$
Wand 2	[3.0, 4.0]	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.72 \end{bmatrix}$	5.5	400	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$
Wand 3	[6.5, 0.5]	$\begin{bmatrix} 0.71 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$	3	460	$\begin{bmatrix} 0.70 & 0 \\ 0 & 0.71 \end{bmatrix}$
Stab (1)	[3.0, 2.0]	$\begin{bmatrix} 0.47 & 0.54 \\ 0.54 & 0.45 \end{bmatrix}$	9	420	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.51 & 0.49 \end{bmatrix}$
Stab (2)	[3.0, 2.0]	$\begin{bmatrix} 0.48 & -0.54 \\ -0.54 & 0.44 \end{bmatrix}$	10	50	$\begin{bmatrix} 0.47 & -0.53 \\ -0.53 & 0.47 \end{bmatrix}$
Stab (3)	[3.0, 2.0]	$\begin{bmatrix} 0 & -0.08 \\ -0.08 & 0.99 \end{bmatrix}$	18	290	$\begin{bmatrix} 0.06 & 0.23 \\ 0.24 & 0.94 \end{bmatrix}$
Stab (4)	[3.0, 2.0]	$\begin{bmatrix} 0.47 & 0.25 \\ 0.26 & 0.93 \end{bmatrix}$	20	220	$\begin{bmatrix} 0.03 & -0.18 \\ -0.19 & 0.96 \end{bmatrix}$



# 5. Messungen und Bewertung der Verfahren

## Einordnung

Die in Kapitel 4 eingeführten Verfahren zur Objektseparierung wurden zuvor anhand synthetisierter Radar-Daten veranschaulicht, wobei ein fiktives Szenario als Grundlage diente. In diesem Kapitel folgt eine Bewertung und Diskussion der eingeführten Verfahren durch die Anwendung auf reale Messdaten. Im Zentrum der Betrachtungen befindet sich der Vergleich der in Abschnitt 4.2 dargestellten Zeitbereichszerlegung und der in Abschnitt 4.3 beschriebenen iterativen Verbundzerlegung von Zeit- und Bildbereichsdaten. Es wird insbesondere die Frage beantwortet, wie die entsprechenden Resultate interpretiert und zur Informationsgewinnung genutzt werden können. Dabei beziehen sich die Untersuchungen auf Messdaten, welche im Jahr 2015 entstanden sind.

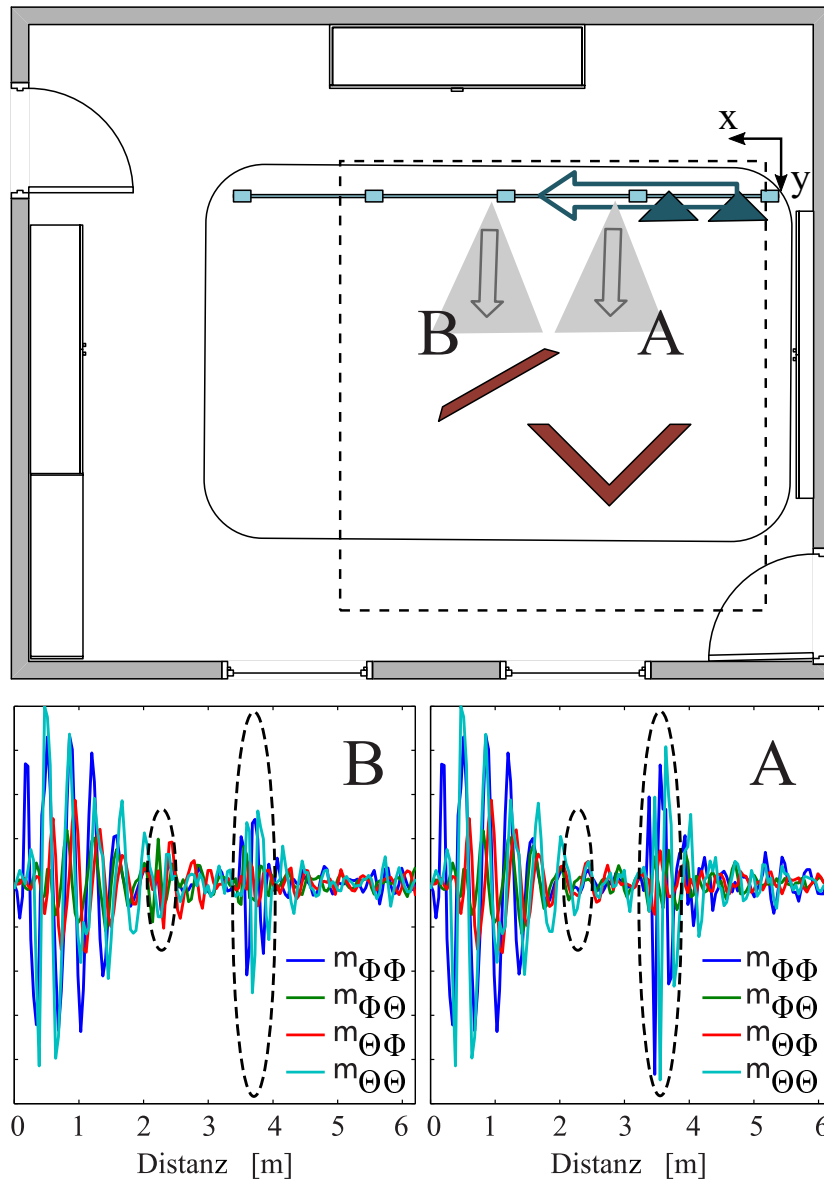
In Abschnitt 5.1 wird das Szenario der Messung mit den verwendeten Systemkomponenten detailliert erläutert. Abschnitt 5.2 thematisiert die Verarbeitung der gewonnenen Daten und stellt Ergebnisse konventioneller und der zuvor vorgestellten polarimetrischen Bildgebungsverfahren gegenüber. Anschließend werden die Bildgebungsresultate des iterativen Zerlegungsverfahrens in Abschnitt 5.3 mithilfe klassischer kohärenter und inkohärenter Methoden hinsichtlich physikalischer Objekteigenschaften analysiert.

## 5.1. Messumgebung

### 5.1.1. Szenario und Zielstellung

Die Messungen wurden in dem in Abbildung 5.1 dargestellten Lagerraum der Technischen Universität Ilmenau durchgeführt, welcher möglichst realistische Umgebungseigenschaften aufwies. Abweichend von Laborumgebungen kam es in keiner Form zur Verwendung elektromagnetischer Absorber, da die Ausbreitungsbedingungen bzw. die Raumimpulsantwort in den Messdaten enthalten sein sollte. Dieses Vorgehen hat eine Ausprägung von Mehrwegepfaden und entsprechende Interferenz von Rückstreukomponenten in den Messdaten zur Folge, welche deut-

lich sichtbar sind. Zwei im Abstand von 30 cm platzierte Hornantennen wurden in quasi-monostatischer Anordnung durch einen Linearpositionierer entlang der x-Richtung verschoben.



**Abbildung 5.1.:** Grundriss der Messumgebung: In quasi-monostatischer Anordnung wurden zwei Hornantennen mithilfe eines Linearpositioniers an zwei Objekten vorbei bewegt (45° gedrehter Stab, Doppelreflektor). Die Darstellungen A und B zeigen Ausschnitte aus den gemessenen Impulsantworten an den im Grundriss gekennzeichneten Positionen, wobei die Rückstreuung der Objekte umrahmt hervorgehoben ist.

In einem Abstand von 110 cm und 150 cm wurden zwei metallische Testobjekte leicht versetzt zueinander platziert: ein vertikal ausgerichteter Doppelreflektor, bestehend aus zwei orthogonalen Metallplatten, und ein 45° gedrehter Stab. Durch die Platzierung beider Objekte auf einem angehobenen Kiesboden entstehen komplexe Beleuchtungsverhältnisse durch den Öffnungswinkel der Hornantennen von 60° und den auftretenden Bodenreflexionen am unregelmäßigen Untergrund. Weiterhin kommt es zu einer Abschattung bzw. Beeinflussung der Rückstreuung einer Hälfte des Doppelreflektors, welche teilweise vom davor platzierten Stab abgeschattet wird. In Abbildung 5.1 ist die Bewegungsrichtung des Positionierers in x-Richtung veranschaulicht. Der in gestrichelter Linie umrahmte Bereich zeigt den anschließend berechneten Bildbereich. Insgesamt kann von verschiedenen Streumechanismen ausgegangen werden, welche sich aufgrund der geometrischen Konstellation in zahlreichen Entfernungszellen überlagern werden. Der Doppelreflektor stellt im Szenario den dominantesten Streumechanismus  $S_{dih}(90^\circ)$  dar, welche durch die charakteristische zweifache Reflexion nach Gleichung 2.15 aus einem breiten Raumwinkelbereich beobachtet werden kann. Es ist zu erwarten, dass der gedrehte Stab eine Zylindermechanismus  $S_{zyl}(45^\circ)$  nach Gleichung 2.16 hervorruft, welcher 45° rotiert in der Sende-Empfangebene angeordnet ist. Aufgrund des Aufbaus des Reflektors treten zudem an dessen vertikalen Kanten jeweils Zylindermechanismen  $S_{zyl}(90^\circ)$  auf, wobei die Abschattung der rechten Kante durch den davor platzierten Stab Auswirkungen auf die beobachtete Signatur haben wird. Ziel der Messungen ist eine möglichst exakte Informationsgewinnung dieser 4 Mechanismen.

### 5.1.2. Radar-Messtechnik

Die Mehrzahl der Publikation verwendet impulsförmige Sendesignale, welche die abgestrahlte Energie auf ein kurzes Zeitfenster konzentrieren. Alternative Anregungssignale wie linear frequenzmodulierte oder rausch-ähnliche Signalformen verteilen diese gleichmäßiger über die gesamte Messzeit, womit hohe Spitzenleistungen bei gleicher abgestrahlter Gesamtenergie vermieden werden. Durch eine der Signalform angepasste Kompression werden nachträglich impulsförmige Messdaten aus dem Empfangssignal extrahiert. Ein an der Technischen Universität Ilmenau verfolgtes Systemkonzept nutzt dazu die Autokorrelationseigenschaften pseudo-zufälliger Maximallängenfolgen (M-Sequenz), um durch Korrelation der rausch-ähnlichen Sende- und Empfangssignale eine Signalkompression mit entsprechendem Korrelationsgewinn vorzunehmen [134–136]. Für die Durchführung der in Kapitel 5 gezeigten experimentellen Messungen kam ein Radar-System diesen Typs zur Anwendung.

Bei der verwendeten Messtechnik handelte es sich um Radar-Module der Firma MEODAT und linear polarisierenden Hornantennen, welche mittels Koaxialleitung

mit Sende- und Empfangskanal verbunden waren. Zur Erfassung der vollständigen Streumatrix wurden dazu die SAR-Messungen 4 Mal hintereinander unter 90°-Rotation jeweils einer Antenne durchgeführt. Das intern erzeugte Sendesignal entspricht einer pseudo-zufälligen binären Maximallängenfolge (m-Sequenz), welche eine näherungsweise impulsförmige Autokorrelationsfunktion aufweist. Durch Korrelation von Sende- und Empfangskanal kann ein gemessenes Rauschsignal in eine der Impulsantwort ähnliche Form transformiert werden. Eine detaillierte Beschreibung der Vor- und Nachteile der Technik kann [135,136] entnommen werden. In Tabelle 5.1 ist ein Überblick der Konfiguration von Messtechnik und Szenario gegeben.

**Tabelle 5.1.: Überblick der Randbedingungen der Messung**

Anregungssignal	m-Sequenz	Synthetische Apertur	2.01 m
Frequenzbereich	0 – 3.5 GHz	Anzahl Messpositionen	67
Eindeutigkeitsbereich	175 m	Abstand der Positionen	3 cm
Entfernungsauflösung	4.29 cm	Bildbereich	$3m \times 3m$

## 5.2. Messdatenverarbeitung

### 5.2.1. Vorverarbeitung

#### Einfluss der Systemkomponenten

Das verwendete Messsystem besteht aus verschiedenen elektronischen Komponenten mit frequenzabhängigen Übertragungsverhalten, deren Charakterisierung und Kompensation in [137,138] ausführlich dargestellt werden. Da für jede Einzelmessung der polarimetrischen Kanäle der selbe Sende-Empfangszug verwendet wird, findet eine Beeinflussung der für diese Arbeit gemessenen Radar-Daten gleichermaßen in allen Kanälen statt. Entsprechend dem Aufbau der Messanordnung ergeben sich die Übertragungsfunktionen von Sender und Empfänger des Radar-Moduls ( $G_{Tx}(f)$ ,  $G_{Rx}(f)$ ), der Koaxialkabel zwischen Modul und Sende- bzw. Empfangsantenne ( $G_{K1}(f)$ ,  $G_{K2}(f)$ ), und der Antennen ( $G_{AntTx}$ ,  $G_{AntRx}$ ). Mithilfe einer direkten Kontaktierung von Sender und Empfänger mit den in der Messung verwendeten Koaxialkabeln, kann ein Teil der Systemkomponenten  $G_1(f)$  nach Gleichung 5.1 charakterisiert werden.

$$G_1(f) = G_{Tx}(f) \cdot G_{K1}(f) \cdot G_{K2}(f) \cdot G_{Rx}(f) \quad (5.1)$$



Im Fall von Laborumgebungen mit kontrollierter Anordnung der beleuchteten Objekte in Hauptstrahlrichtung der Antennen, kann zudem eine Charakterisierung des vollständigen Übertragungspfades von Sender zu Empfänger in Form einer *in situ* Messungen einer definierten Freiraumdistanz herangezogen werden. In [121] wurde dazu eine Möglichkeit der Vorverarbeitung von RCS-Messdaten in einer echoarmen Laborumgebung vorgestellt. Für Messungen in realistischen Umgebungen ergibt sich am Empfänger eine Überlagerung zahlreicher Wellenfronten, deren räumlicher Ursprung bzw. Raumrichtung nicht aufgelöst werden können. Bei Verwendung einer Antenne mit rotationssymmetrischer Richtcharakteristik und mechanischer Rotation um das Phasenzentrum, kann jedoch eine Beeinflussung dominanter Rückstreukomponenten in Hauptstrahlrichtung vernachlässigt werden. Nach Gleichung 5.2 ergibt sich damit ein gemessenes Übertragungsverhalten  $G_{Mess}(f)$ , welches von Systemeinflüssen bereinigt zu  $\tilde{G}(f)$  umgeformt werden kann.

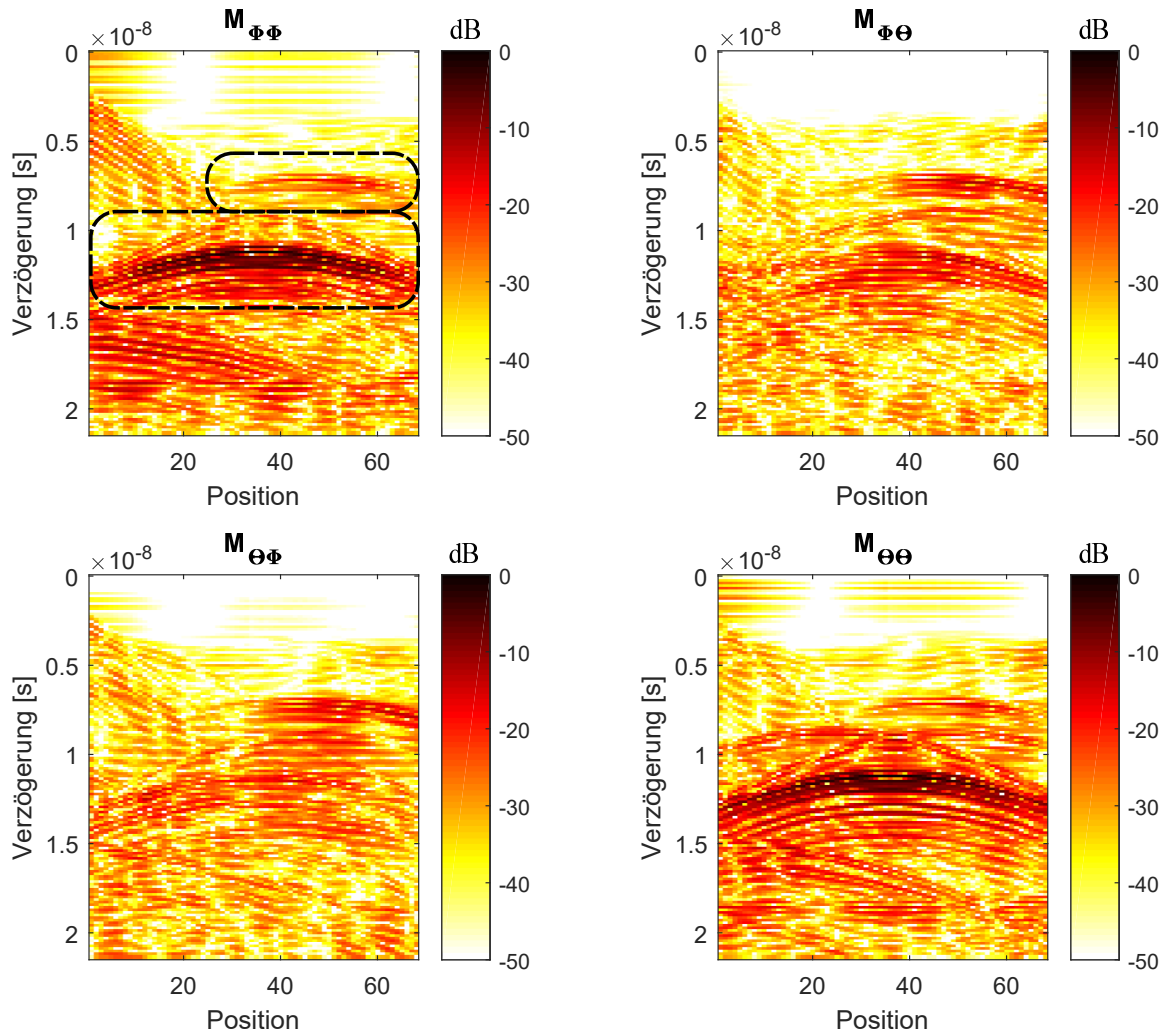
$$\tilde{G}(f) = \frac{G_{Mess}(f)}{G_1(f)} \quad (5.2)$$

### Aufbereitung der Messdaten

Nach Kompensation der wesentlichen Einflüsse der Systemkomponenten ergeben sich Messdaten als Überlagerung dynamischer und statischer Signalkomponenten, wobei durch die Bewegung der Antennen sämtliche Rückstreuungen der Umgebung den dynamischen Komponenten angehören. Statische Restsignale können jedoch durch nicht vollständig entferntes internes Übersprechen innerhalb der Systemkomponenten und zum wesentlichen Teil durch direktes Übersprechen zwischen Sende- und Empfangsantenne entstehen. Diese Signalanteile können jedoch als Hintergrund der Messdaten nach Gleichung 5.3 näherungsweise als Mittelwert der Gesamtdaten angenommen und entsprechend subtrahiert werden.

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{dynamisch} + \mathbf{M}_{statisch} \approx \mathbf{M}_{dynamisch} + E\{\mathbf{M}\} \quad (5.3)$$

In Abhängigkeit von Messumgebung und Bewegungspfad der Antennen kann die Schätzung des statischen Hintergrunds auch durch andere Methoden gewährleistet werden, welche in [139] zusammengefasst sind. Abbildung 5.2 zeigt die aufbereiteten Messdaten, welche für alle nachfolgenden Bildgebungs- und Analyseschritte verwendet wurden. Es wird deutlich, dass sich zahlreiche Rückstreukomponenten der Umgebung sowie Mehrwegeausbreitungspfade mit der Rückstreuung der Objekte überlagern und sich eine zunächst schwierig zu interpretierende Darstellung der Radar-Daten im Zeitbereich ergibt.

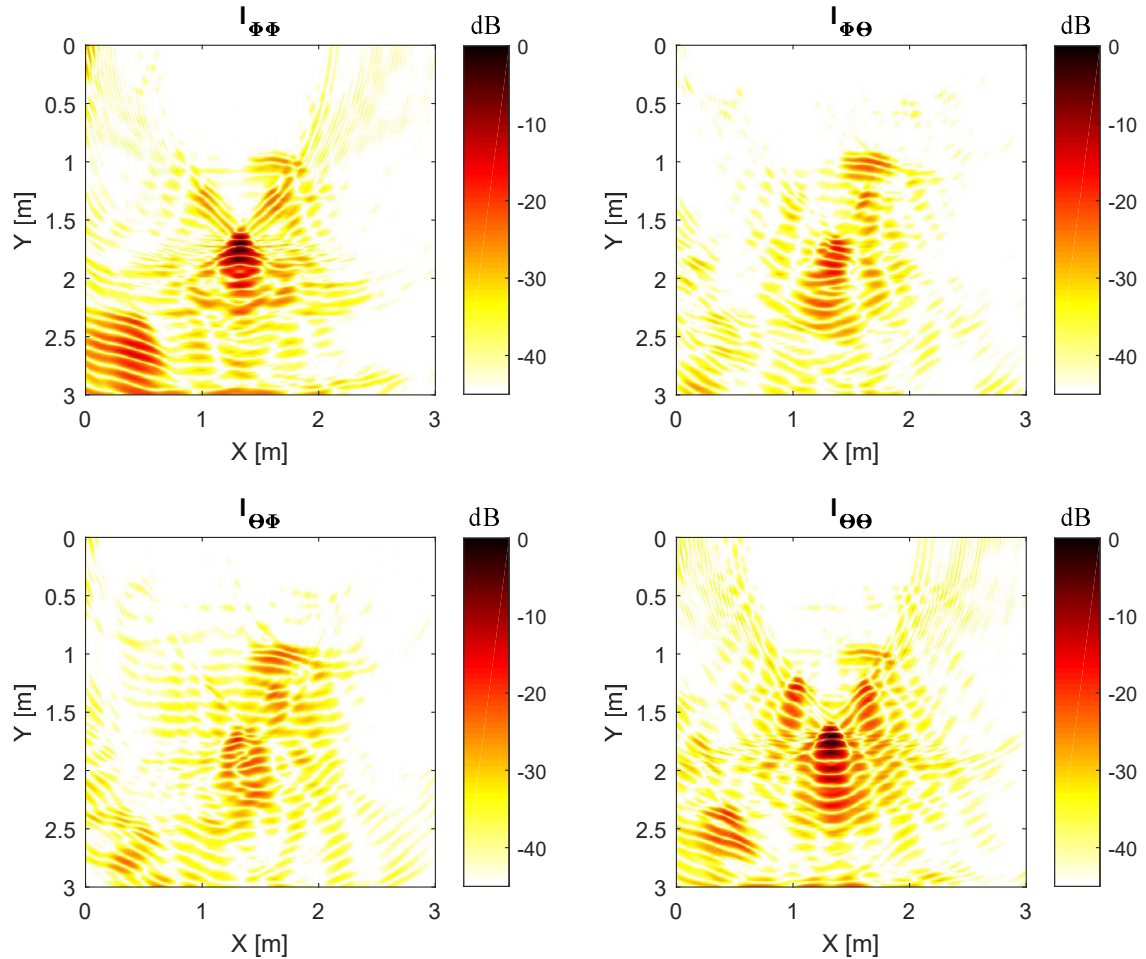


**Abbildung 5.2.:** Gemessene Radar-Daten des in Abbildung 5.1 dargestellten Szenarios in lexikographischer Darstellung: Die nach Kompensation der Systemeinflüsse und Abziehen des statischen Hintergrunds ermittelten Radar-Daten beinhalten neben der Rückstreuung der eigentlichen Zielobjekte (eingerahmt) ebenfalls zahlreiche Signalkomponenten der Umgebung.

### 5.2.2. Konventionelle Bildgebung

Zur Transformation der Radar-Daten in den Bildbereich wurde die in Unterabschnitt 3.2.2 definierte Kirchhoff-Migration angewendet, wobei die Eingangsdaten unverändert ohne weitere polarimetrische Verarbeitung im Sinn konventioneller Bildgebungsmethoden fokussiert wurden. Abbildung 5.3 zeigt das Re-

sultat der Transformation in lexikographischer Darstellung. Zum Verständnis des Koordinatensystems muss darauf hingewiesen werden, dass die Ausrichtung der x-Achse in den Bildgebungsresultaten identisch der tatsächlichen Bewegungsrichtung der Antennen und damit gespiegelt zum Grundriss in Abbildung 5.1 dargestellt ist.



**Abbildung 5.3.:** Lexikographisches Bildgebungsresultat: Mithilfe der Kirchhoff Migration wurden die Zeitbereichsdaten aus Abbildung 5.2 in den Bildbereich transformiert.

Besonders in den kopolaren Darstellungen zeigt sich die dominante Doppelreflexion, welche ebenfalls einige Mehrdeutigkeiten aufgrund von mehrfachen Reflexionen am Objekt beinhaltet. Der gedrehte Stab an  $[X, Y]$ -Position  $[1.65m, 1.05m]$  ist besonders in den kreuzpolaren Abbildungen deutlich erkennbar. Da es sich bei dem verwendeten Doppelreflektor um ein ausgedehntes Objekt aus zwei im

Winkel von  $90^\circ$  angeordneten Metallflächen handelt, überlagern sich zahlreiche Rückstreuikomponenten der verschiedenen Objektbestandteile. So werden die Flächen des Reflektors deutlich in  $I_{\Phi\Phi}$  dargestellt, wohingegen die linke und rechte Kante der Flächen mit einigen Mehrdeutigkeiten in  $I_{\Theta\Theta}$  an Position  $[1.05m, 1.30m]$  und  $[1.65m, 1.30m]$  zu erkennen sind. In Tabelle 5.2 werden die einzelnen Objektmerkmale mit ihren Positionen und extrahierten Streumatrizen aus Zeit- und Bildbereich zusammengefasst verdeutlicht.

**Tabelle 5.2.:** Normierte Streumatrizen im Vergleich: Die angegebenen Verzögerungszeiten, Messpositionen und X-Y-Positionen beziehen sich auf exemplarische Teile der Zeit- und Bildbereichsdaten in Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3.

Objekt	Bildbereich		Zeitbereich		
	Bezeichnung	[X, Y] [m]      Streumatrix	$\tau$ [ns]	Pos.	Streumatrix
linke Kante	[1.05, 1.30]	$\begin{bmatrix} 0.30 & 0.06 \\ -0.01 & 0.95 \end{bmatrix}$	9.2	23	$\begin{bmatrix} 0.06 & -0.04 \\ 0.04 & 0.99 \end{bmatrix}$
rechte Kante	[1.65, 1.30]	$\begin{bmatrix} 0.34 & -0.39 \\ -0.27 & 0.81 \end{bmatrix}$	9.2	49	$\begin{bmatrix} 0.13 & -0.44 \\ -0.48 & 0.75 \end{bmatrix}$
. Eckreflektor	[1.35, 1.75]	$\begin{bmatrix} 0.67 & -0.01 \\ 0.01 & -0.74 \end{bmatrix}$	11.5	36	$\begin{bmatrix} 0.70 & -0.12 \\ 0.05 & 0.71 \end{bmatrix}$
Stab	[1.65, 1.05]	$\begin{bmatrix} 0.46 & 0.58 \\ 0.47 & 0.49 \end{bmatrix}$	7.3	49	$\begin{bmatrix} 0.42 & 0.61 \\ 0.48 & 0.47 \end{bmatrix}$

Insgesamt beinhalteten Zeit- und Bildbereich zahlreiche Artefakte und Mehrdeutigkeiten, welche die Interpretation einer zuvor unbekannten Umgebung erschweren. Diese Störungen werden maßgeblich verursacht durch Effekte der Mehrwegeausbreitung zwischen Boden und Objekten sowie Mehrfachreflexionen und Interaktionen zwischen den Objekten der Umgebung. Weiterhin zeigen die extrahierten polarimetrischen Signaturen besonders im Fall des dominanten Eckreflektors eine hohe Ähnlichkeit zum idealisierten Mechanismus einer Doppelreflexion. Andere Objektbestandteile beinhalten jedoch offensichtlich eine Überlagerung mehrerer Streumechanismen. Aus dem Zeitbereich der Radar-Daten ergibt die Streumatrix der linken Kante einen klaren Dipolmechanismus mit einer Ausrichtung

von  $\psi = 90^\circ$ . Der identische Mechanismus der rechten Kante überlagert sich jedoch durch Abschattungseffekte des davor platzierten gedrehten Stabs mit anderen Mechanismen und besitzt in den Messdaten eine geringere Ähnlichkeit mit einem Dipolmechanismus.

Aus dem Bildbereich extrahierte Streumatrizen sind für Mechanismen, welche während der gesamten Messzeit sichtbar sind (Eckreflektor) vergleichbar zum Zeitbereich und werden ohne Verfälschungen abgebildet. In die Bildbereichen der Kanten zeigen sich jedoch deutliche Überlagerungen aus Entfernungszellen, welche in Folge der Integration über sämtliche Messpositionen andere Streumechanismen enthalten. So beinhaltet die linke Kante eine erhöhte  $\Phi\Phi$ -Intensität im Bildbereich, was auf eine Überlagerung mit dem Wandmechanismus der Flächen des Reflektors hindeutet.

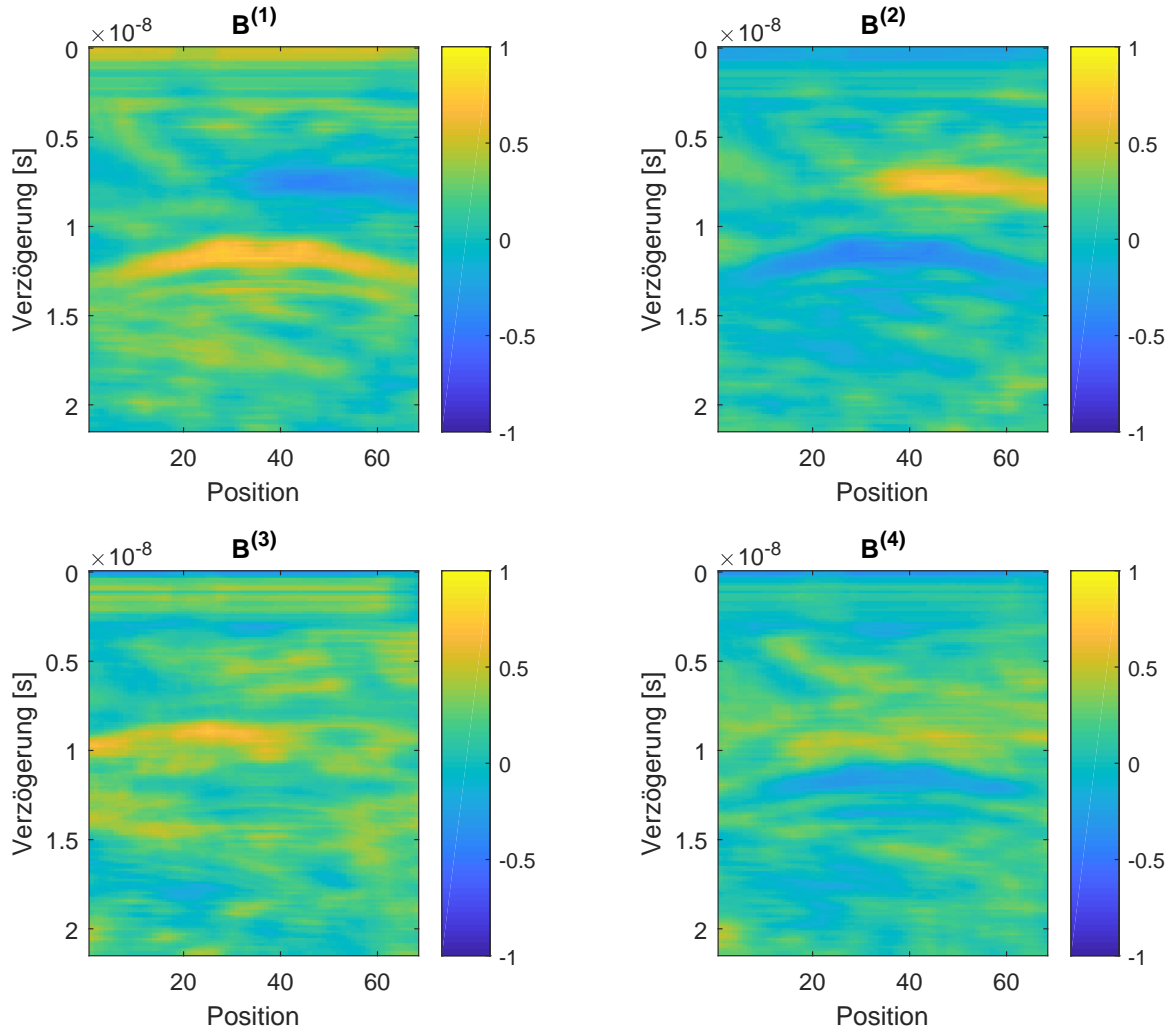
### 5.2.3. Bildgebung nach Zerlegung im Zeitbereich

Zur Anwendung des in Abschnitt 4.2 vorgestellten Verfahrens werden die polarimetrischen Signaturen der zu unterscheidenden Objekte als Vorabinformation benötigt. Dazu dienen die in Tabelle 5.2 gegebenen direkt aus dem Zeitbereich extrahierten normierten Streumatrizen für

- (1) - Doppelreflexion am Eckreflektor mit  $\mathbf{S}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.70 & -0.12 \\ 0.05 & 0.71 \end{bmatrix},$
- (2) - Dipolmechanismus am  $45^\circ$  rotierten Stab mit  $\mathbf{S}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0.42 & 0.61 \\ 0.48 & 0.47 \end{bmatrix},$
- (3) - linke vertikale Kante des Reflektors, mit  $\mathbf{S}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0.06 & -0.04 \\ 0.04 & 0.99 \end{bmatrix},$
- (4) - rechte vertikale Kante des Reflektors mit  $\mathbf{S}^{(4)} = \begin{bmatrix} 0.13 & -0.44 \\ -0.48 & 0.75 \end{bmatrix}.$

Zielstellung des Verfahrens ist die Unterscheidung jeweils zwei dieser Signaturen anhand der gemessenen Entfernungszellen. Dazu werden die Elemente der Kovarianzmatrizen gemäß Gleichung 4.3 in Merkmalsvektoren überführt und zur Bestimmung eines idealen Referenzvektors  $\mathbf{b}_{Ref}$  nach Gleichung 4.10 genutzt. Mithilfe dieses Vektors findet eine Projektion sämtlicher Entfernungszellen Anwendung, wodurch die Messdaten auf die neue Basis des Referenzvektors abgebildet werden.

Abbildung 5.4 zeigt die Ergebnisse der Projektion anhand der Gewichtungsmatrizen  $\mathbf{B}^{(1)}$  bis  $\mathbf{B}^{(4)}$ , wobei für die nachfolgende Detektion des gesuchten Streumechanismus jeweils ein Schwellwert  $\chi = 0.5$  angewendet wird.  $\mathbf{B}^{(1)}$  zeigt bspw. die

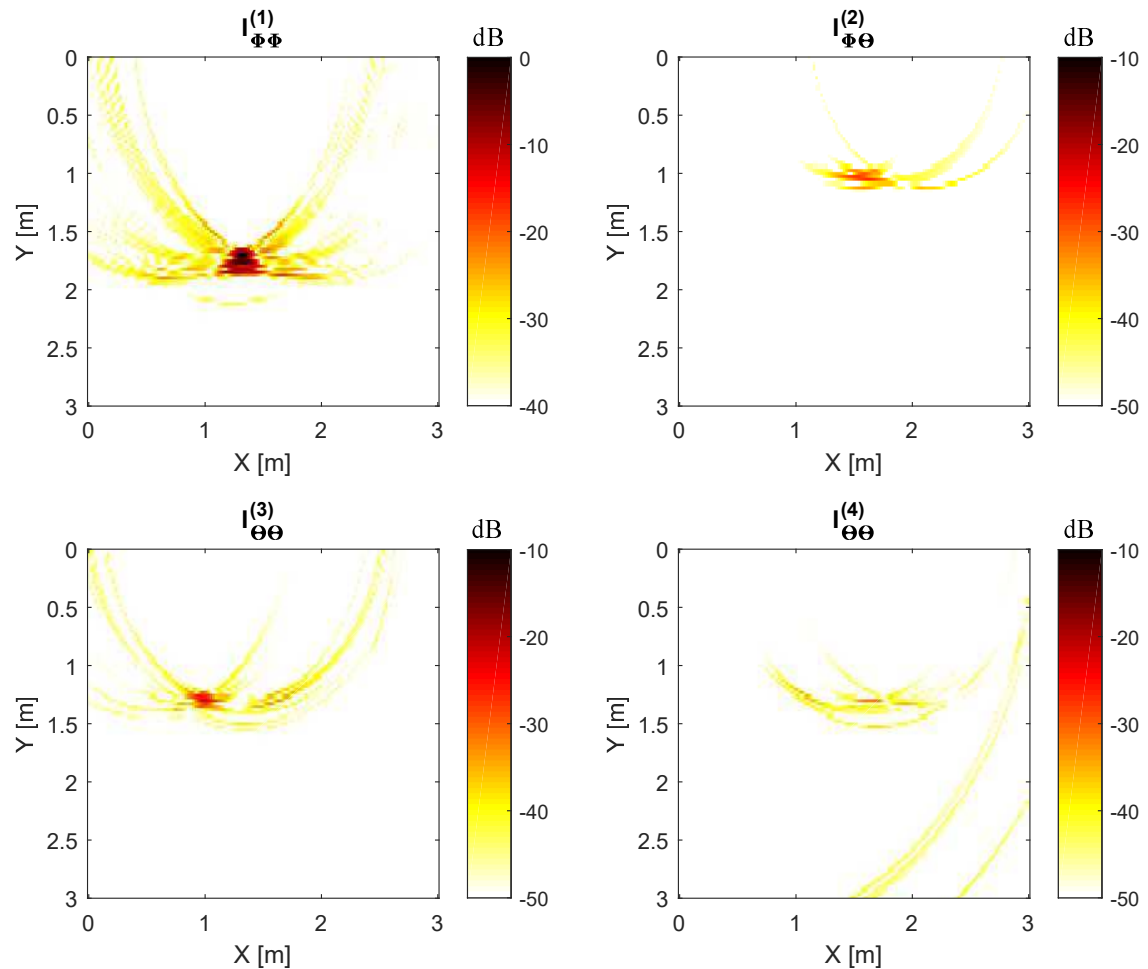


**Abbildung 5.4.:** Gewichtungsmatrizen der Radar-Daten:  $\mathbf{B}^{(1)}$  - Doppelreflektor,  $\mathbf{B}^{(2)}$  - Stab,  $\mathbf{B}^{(3)}$  - linke Kante,  $\mathbf{B}^{(4)}$  - rechte Kante

Separierung des Dipolmechanismus von der Doppelreflexion am zweiflächigen Reflektor.

Unter Nutzung der Gewichtungsmatrizen wird im folgenden Verarbeitungsschritt eine Detektion der Entfernungszellen der gesuchten polarimetrischen Signaturen vorgenommen. Daraus folgen vier verschiedene Selektionen gemessener Radar-Daten, welche in den Bildbereich transformiert werden. Die resultierenden Abbildungen enthalten lediglich Objektrückstreuungen der gesuchten polarimetrischen Muster, wobei Abbildung 5.5 ausgewählte Komponenten der Bildbereiche zeigt. Die hochgestellte Kennzeichnung (1) bis (4) bezieht sich auf die Streumecha-

nismen von Doppelreflektor, Stab, sowie linker und rechter Kante der Flächen des Reflektors. Besonders die zuletzt genannte Komponente wird von dem davor platzierten Stab deutlich abgeschattet und kann nur mit geringer Intensität abgebildet werden.



**Abbildung 5.5.:** Bildgebung nach Zeitbereichszelegung: Mithilfe der in Abbildung 5.4 dargestellten Ergebnisse wurden die Radar-Daten gewichtet und anschließend in den Bildbereich transformiert. Dargestellt sind ausgewählte ko- oder kreuzpolare Bildbereiche, welche sich auf die vier zu identifizierenden Mechanismen beziehen. Die genauen lexikographischen Resultate können Abbildung B.5 bis Abbildung B.8 entnommen werden.

Aufgrund der Reduzierung der für die Bildgebung genutzten Entfernungszellen durch Gewichtung der Radar-Daten, entstehen im Bildbereich deutlich weni-

ger Artefakte und Mehrdeutigkeiten, wodurch eine Unterscheidung der verschiedenen Umgebungsbestandteile erheblich verbessert wird. Tabelle 5.3 zeigt die Übersicht der normierten polarimetrischen Signaturen aus Zeit- und Bildbereich, wobei sich die Bildbereichsangaben auf die jeweiligen Darstellungen der einzelnen Zerlegungsergebnisse beziehen.

**Tabelle 5.3.:** Normierte Streumatrizen im Vergleich: Die angegebenen Verzögerungszeiten, Messpositionen und X-Y-Positionen beziehen sich auf exemplarische Teile der Zeit- und Bildbereichsdaten in Abbildung 5.2 und Abbildung 5.5.

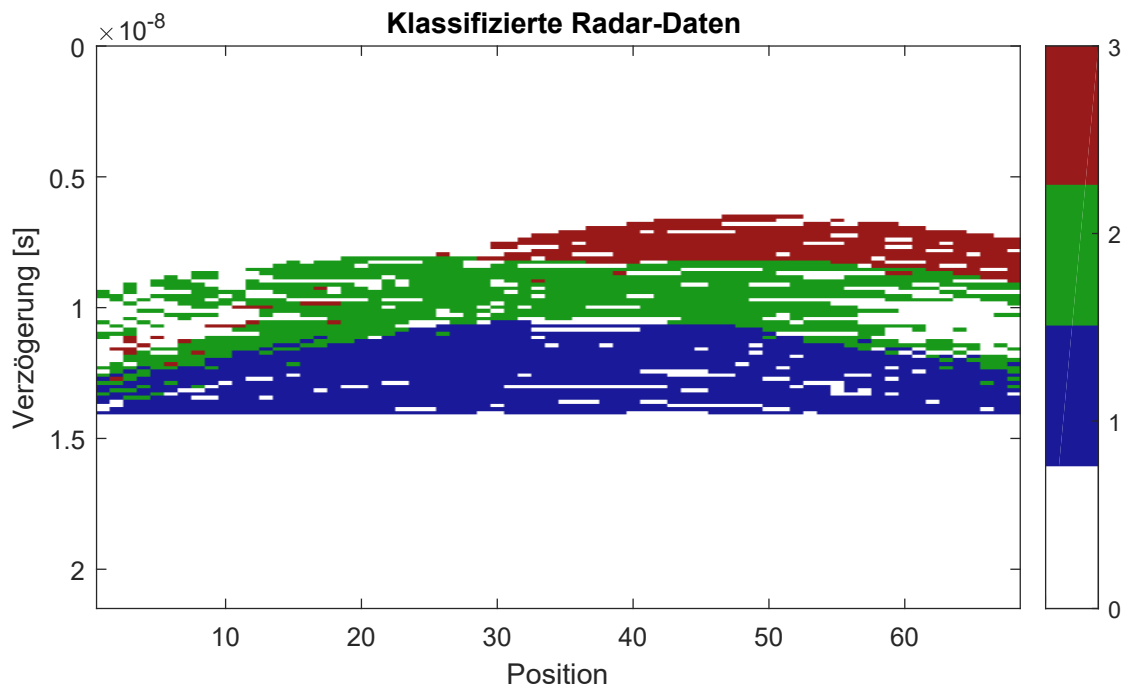
Objekt	Bildbereich		Zeitbereich		
	Bezeichnung	[X, Y] [m]      Streumatrix	$\tau$ [ns]	Pos.	Streumatrix
linke Kante	[1.05, 1.30]	$\begin{bmatrix} -0.03 & 0.05 \\ 0.08 & 0.99 \end{bmatrix}$	9.2	23	$\begin{bmatrix} 0.06 & -0.04 \\ 0.04 & 0.99 \end{bmatrix}$
rechte Kante	[1.65, 1.30]	$\begin{bmatrix} 0.07 & -0.53 \\ -0.42 & 0.74 \end{bmatrix}$	9.2	49	$\begin{bmatrix} 0.13 & -0.44 \\ -0.48 & 0.75 \end{bmatrix}$
. Eckreflektor	[1.35, 1.75]	$\begin{bmatrix} 0.69 & 0.01 \\ 0.00 & -0.72 \end{bmatrix}$	11.5	36	$\begin{bmatrix} 0.70 & -0.12 \\ 0.05 & 0.71 \end{bmatrix}$
Stab	[1.65, 1.05]	$\begin{bmatrix} 0.46 & 0.55 \\ 0.47 & 0.51 \end{bmatrix}$	7.3	49	$\begin{bmatrix} 0.42 & 0.61 \\ 0.48 & 0.47 \end{bmatrix}$

Bezogen auf die extrahierten Streumatrizen besteht nach erfolgter Filterung eine größere Ähnlichkeit zwischen Zeit- und Bildbereichsdarstellung, da einige störende Überlagerungen verschiedener Streumechanismen vermieden werden können. Insbesondere am Beispiel der linken Kante des Reflektors lässt sich der Unterschied zur konventionellen Bildgebung verdeutlichen. In Tabelle 5.2 wurde der Bildbereich der linken Kante des Reflektors mit der Streumatrix  $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.06 \\ -0.01 & 0.95 \end{bmatrix}$  gekennzeichnet, wobei die erhöhte kopolare  $\Phi\Phi$ -Komponente mutmaßlich durch eine Überlagerung mit dem Wandmechanismus der Flächen des Reflektors entsteht. Nach erfolgter Zerlegung des Zeitbereichs ist dieser Einfluss, wie in Tabelle 5.3 gekennzeichnet, entfernt worden und die Streumatrix kann deutlicher einem Dipolmechanismus mit vertikaler Orientierung zugeordnet werden.



#### 5.2.4. Bildgebung nach iterativer Verbundzerlegung

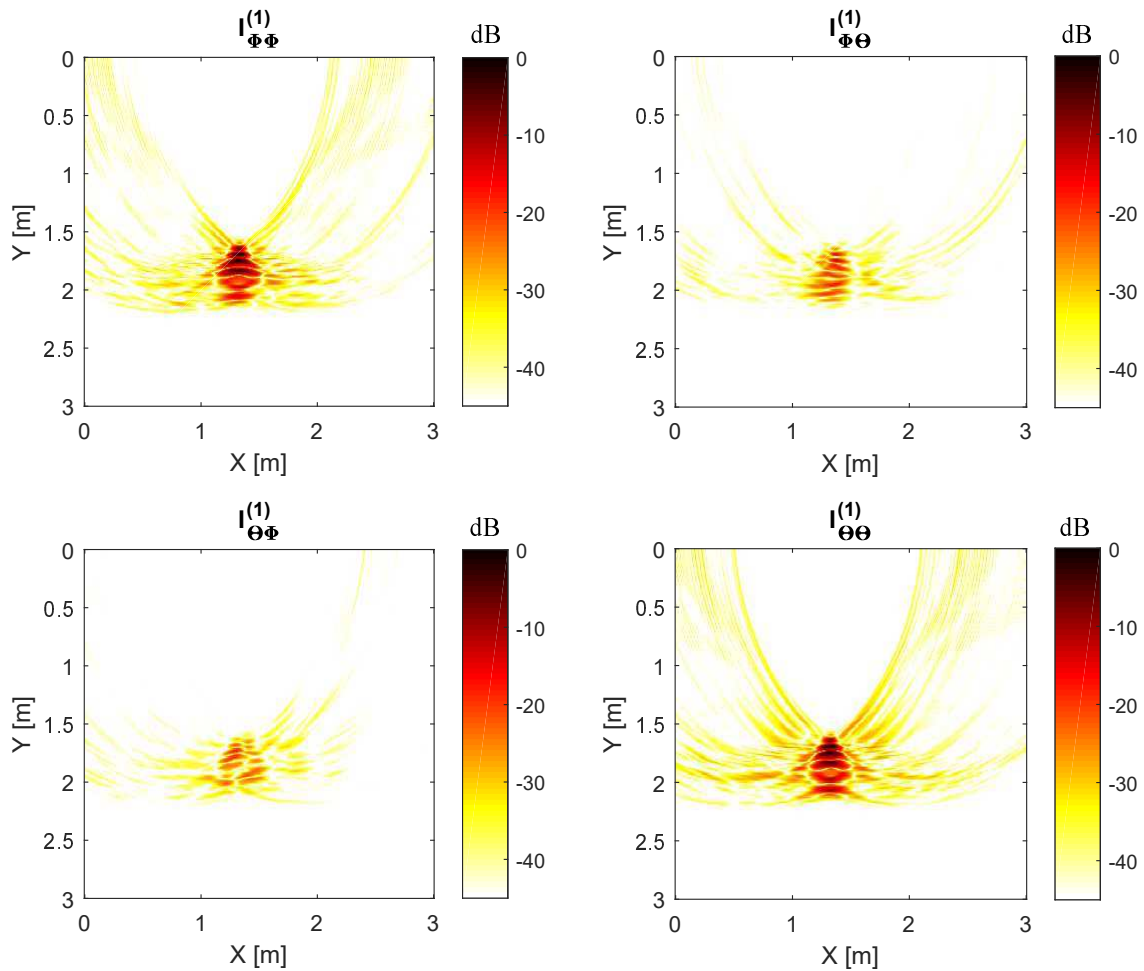
Aufgrund der Einfachheit der Berechnung, bietet die Zerlegung im Zeitbereich anhand vorgegebener polarimetrischer Signaturen eine berechnungseffiziente Möglichkeit der Filterung gewonnener Radar-Daten nach zuvor bekannten Mustern. Im Fall unbekannter Rückstreuverhältnisse müssen markante Mechanismen jedoch durch unüberwachte Methoden der statistischen Analyse der Radar-Daten zunächst extrahiert werden. Das in Abschnitt 4.3 vorgestellte Verfahren der iterativen Zerlegung von Bild- und Zeitbereich führt dazu ein Clustering ähnlicher Signaturen in einer Auswahl von Entfernungszellen im Zeitbereich aus, wobei die Selektion anhand zuvor im Bildbereich identifizierter maximaler Intensitäten vorgenommen wird.



**Abbildung 5.6.:** Klassifizierte Radar-Daten als Gruppen zusammengefasster Clustering-Ergebnisse. Insgesamt wurden 6 Cluster in 3 Gruppen unterschieden. Es besteht eine hohe Ähnlichkeit zwischen der Rückstreuung der vertikalen Kanten (2-grün), der mehrfachen Doppelreflexionen (1-blau) und der Rückstreuung des gedrehten Stabs (3-rot).

Durch dieses Vorgehen werden neben ähnlichen polarimetrischen Signaturen auch Entfernungszellen, welche im selben Bildbereich fokussiert werden miteinander assoziiert, wodurch eine hierarchische Untergliederung der Daten nach Art

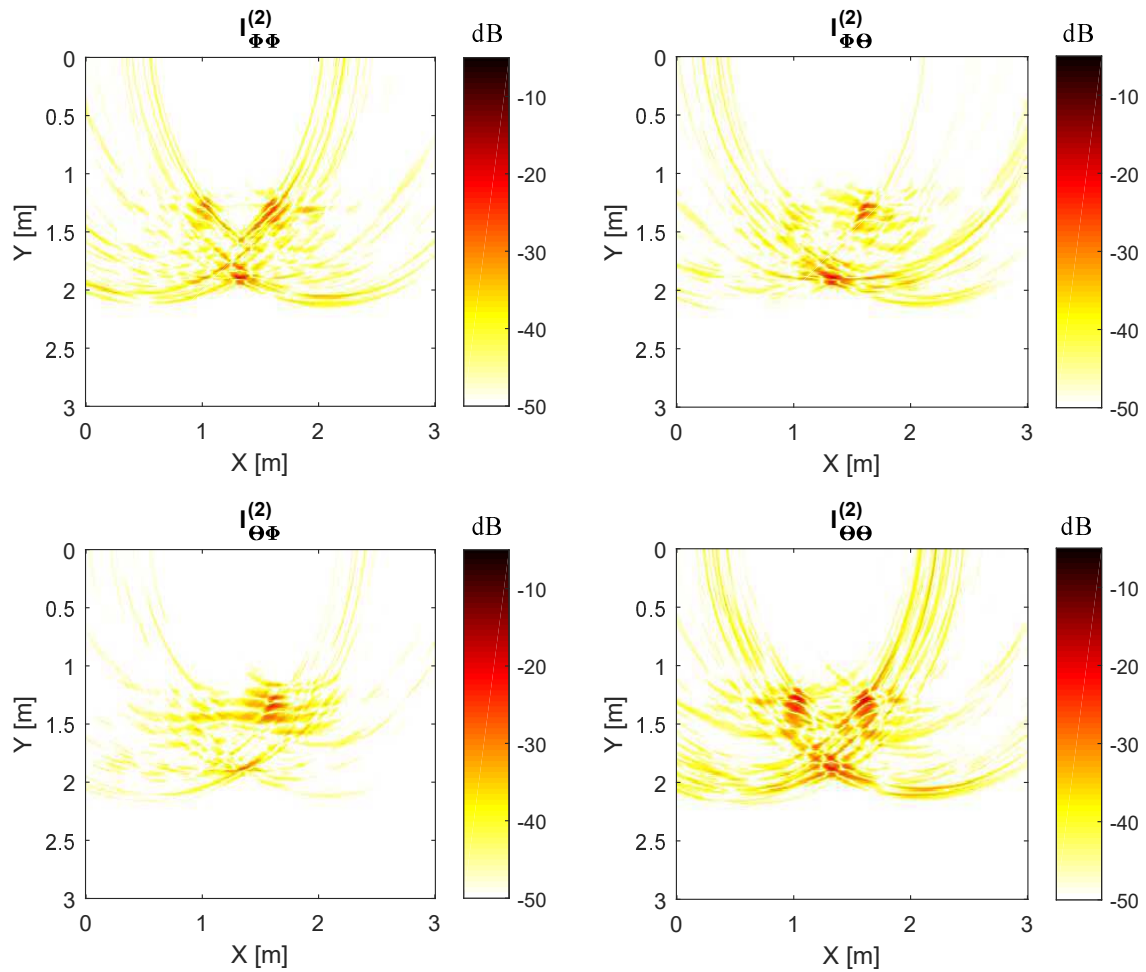
und Position der Rückstreuung auf die entsprechenden Cluster abgebildet wird. Angewendet auf die gemessenen Radar-Daten ergeben sich insgesamt 6 Cluster, welche sich durch deren räumlichen Ursprung oder polarimetrischen Signatur unterscheiden. Fasst man die Cluster ähnlicher Signatur zusammen, ergeben sich die in Abbildung 5.6 dargestellten drei Gruppen ähnlicher Entfernungszellen. Diese beinhalten die durch den Reflektor hervorgerufenen Mehrfachreflexionen (Gruppe 1, blau), Streuung der vertikalen Kanten des Reflektors (Gruppe 2, grün) sowie die Rückstreuung des  $45^\circ$  gedrehten Stabs (Gruppe 3, rot).



**Abbildung 5.7.:** Bildgebung nach Verbundzerlegung: Die Radar-Daten wurden nach der Zugehörigkeit der in Abbildung 5.6 blau dargestellten Cluster-Gruppe 1 selektiert.

Verwendet man die Cluster-Zugehörigkeit zur Selektion der Entfernungszellen, ergeben sich die in Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.9 dargestellten Bildgebungsre-

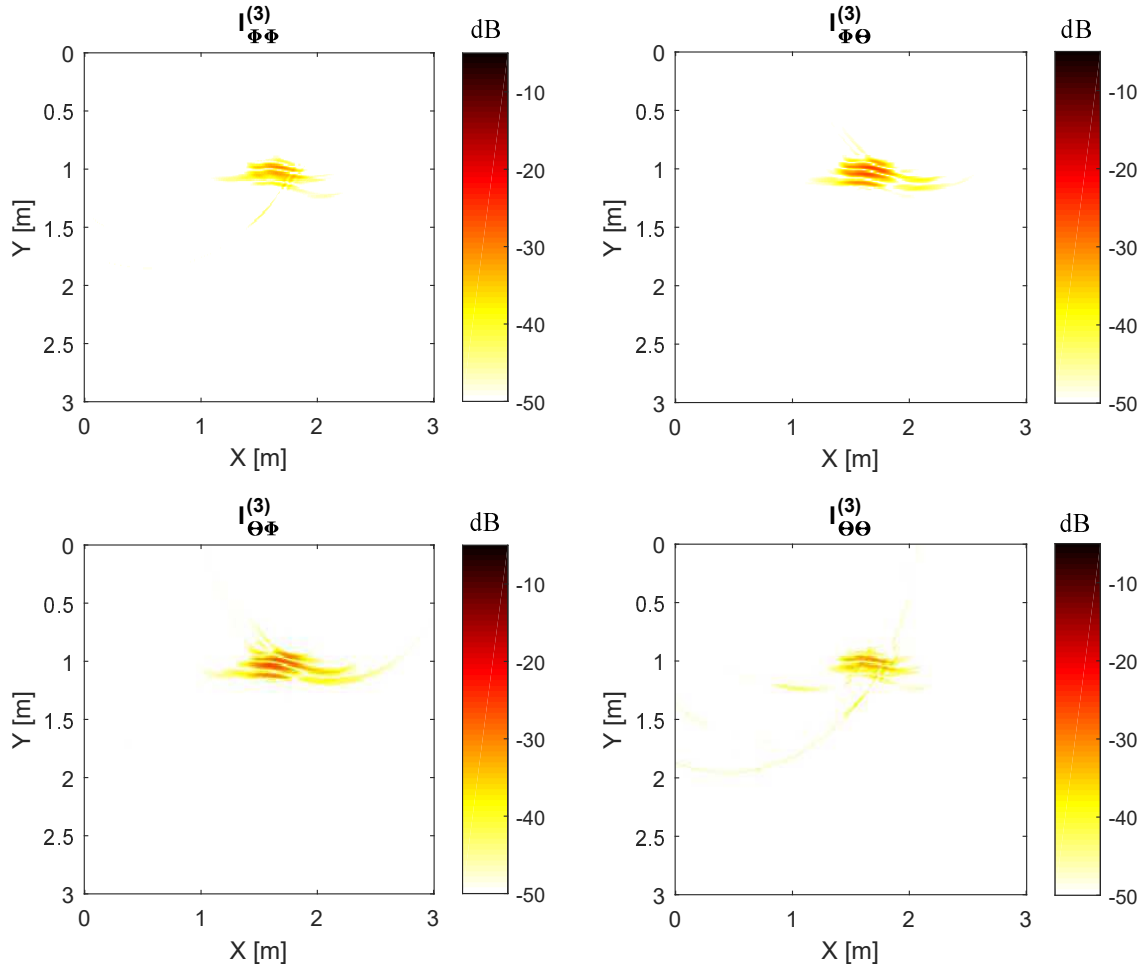
sultate. Die lexikographischen Darstellungen kennzeichnen sich durch ein deutlich geringeres Maß an Bildartefakten im Vergleich zur konventionellen Bildgebung in Abbildung 5.3 und erlauben damit die Lokalisierung der einzelner Streumechanismen im Bildbereich. Das Vorgehen unüberwachter Klassifikation bietet zudem die Möglichkeit gewonnene Radar-Daten ohne Kenntnis bzw. Erwartungshaltung an auftretende Signaturen zu analysieren. So ergeben die Abbildungen der vertikalen Kanten in  $I^{(2)}$  eine Sichtbarkeit der vorderen beiden Kanten der metallischen Flächen des Reflektors und zusätzlich eine Komponente mit ähnlicher Signatur, welche die vertikale Ecke des Reflektors kennzeichnet.



**Abbildung 5.8.:** Bildgebung nach Verbundzerlegung: Die Radar-Daten wurden nach der Zugehörigkeit der in Abbildung 5.6 grün dargestellten Cluster-Gruppe 2 selektiert.

Die normierten Streumatrizen aus Zeit- und Bildbereich sind nochmals in

Tabelle 5.4 zusammengefasst. Im Vergleich zum Verfahren der Zeitbereichszerlegung anhand vorgegebener Signaturen bilden sich die Unterschiede der Vorgehensweise des Clustering-Verfahrens in die Resultate ab. So bestimmen zahlreiche Freiheitsgrade bei der Wahl der Anzahl der Cluster bzw. der Fusionierung ähnlicher Cluster die letztendliche Gruppierung der Entfernungszellen. Dies betrifft insbesondere die Schwellwerte der verwendeten Distanzmetrik zwischen den Cluster-Zentren, welche zur Prüfung der Ähnlichkeit herangezogen wird.



**Abbildung 5.9.:** Bildgebung nach Verbundzerlegung: Die Radar-Daten wurden nach der Zugehörigkeit der in Abbildung 5.6 rot dargestellten Cluster-Gruppe 3 selektiert.

Hauptanliegen der Vorverarbeitung polarimetrischer Zeitbereichsdaten war zunächst die Verringerung unerwünschter Bildartefakte und Mehrdeutigkeiten einer anschließend angewendeten Transformation in den Bildbereich. Ähnlich der Her-

**Tabelle 5.4.:** Normierte Streumatrizen im Vergleich: Die Angaben im Zeitbereich beziehen sich auf Abbildung 5.2. Aus Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.9 wurden die Vergleichswerte des Bildbereichs entnommen.

Objekt	Bildbereich		Zeitbereich		
Bezeichnung	[X, Y] [m]	Streumatrix	$\tau$ [ns]	Pos.	Streumatrix
linke Kante	[1.05, 1.30]	$\begin{bmatrix} 0.38 & -0.07 \\ 0.00 & 0.92 \end{bmatrix}$	9.2	23	$\begin{bmatrix} 0.06 & -0.04 \\ 0.04 & 0.99 \end{bmatrix}$
rechte Kante	[1.65, 1.30]	$\begin{bmatrix} 0.31 & -0.37 \\ -0.29 & 0.83 \end{bmatrix}$	9.2	49	$\begin{bmatrix} 0.13 & -0.44 \\ -0.48 & 0.75 \end{bmatrix}$
. Eckreflektor	[1.35, 1.75]	$\begin{bmatrix} 0.68 & -0.01 \\ -0.00 & -0.73 \end{bmatrix}$	11.5	36	$\begin{bmatrix} 0.70 & -0.12 \\ 0.05 & 0.71 \end{bmatrix}$
Stab	[1.65, 1.05]	$\begin{bmatrix} 0.45 & 0.58 \\ 0.49 & 0.47 \end{bmatrix}$	7.3	49	$\begin{bmatrix} 0.42 & 0.61 \\ 0.48 & 0.47 \end{bmatrix}$

angehensweise modellbasierter Bildgebungsverfahren bieten die vorgestellten Verfahren eine Aufteilung der Bildgebungsresultate auf mehrere Objektmodelle, welche in diesem Fall durch die polarimetrische Signatur unterschiedlicher Rückstreuobjekte gebildet werden. Eine unüberwachte Klassifikation der Daten bietet dabei potentiell ein höheres Maß an Vollständigkeit in Bezug auf die erfassten Signalkomponenten der Umgebung, da bei der Filterung anhand vorgegebener polarimetrischer Signaturen lediglich bereits bekannte bzw. anhand kanonischer Mechanismen festgelegte Muster detektiert werden.

Die letztendlichen Bildgebungsresultate unterschiedlicher polarimetrischer Rückstreuobjekte können anschließend mithilfe konventioneller polarimetrischer Auswertungsmethoden analysiert werden und dienen der Extraktion von Objekteigenschaften. Im folgenden Abschnitt werden dazu die Resultate der iterativen Zerlegung von Zeit- und Bildbereich in Form der gewonnenen Cluster analysiert. Dabei dienen die Cluster-Zentren, welche als mittlere Streumatrix der gruppierten Entfernungszellen gebildet werden, als Ausgangspunkt einer kohärenten Zerlegung. Weiterhin bietet die Zusammensetzung bzw. die Verteilung der Entfernungszellen innerhalb der Cluster statistische Informationen, welche mittels inkohärenter Entropie-Alpha-Zerlegung untersucht werden.

## 5.3. Charakterisierung der Rückstreueobjekte

Als Ergebnis der iterativen Zerlegung von Zeit- und Bildbereich bieten die extrahierten Cluster jeweils eine Selektion von Entfernungszellen. Konventionell nutzen Bildgebungsverfahren die zugrundeliegende Messposition und Entfernung als Meta-Informationen der Radar-Daten, wohingegen die Gruppierung der Entfernungszellen in Clustern zusätzliche Informationen der Position im Bildbereich und der Ähnlichkeit polarimetrischer Signaturen bereitstellt. Somit eröffnen die Ergebnisse des Verfahrens eine tiefere Strukturierung der Daten, welche ableitbare Informationen der vorkommenden Streumechanismen enthalten.

So lässt sich über die Gesamtheit der Entfernungszellen eines Clusters eine mittlere polarimetrische Signatur, wie in Tabelle 5.4 dargestellt, bestimmen. Bei idealer Arbeitsweise des Verfahrens beinhaltet jeder Cluster lediglich einzelne Rückstreumechanismen, wodurch kohärente Zerlegungsverfahren für die Analyse des Cluster-Zentrums angewendet werden können. Je nach Parametrierung des EM-Algorithmus kann es jedoch zu Überlagerungen einiger weniger Streumechanismen innerhalb eines Clusters kommen. In diesem Fall stellen die mittleren statistischen Eigenschaften der Entfernungszellen in Form der Verteilung der Cluster im Parameterraum die Grundlage für inkohärente Zerlegungsmethoden dar.

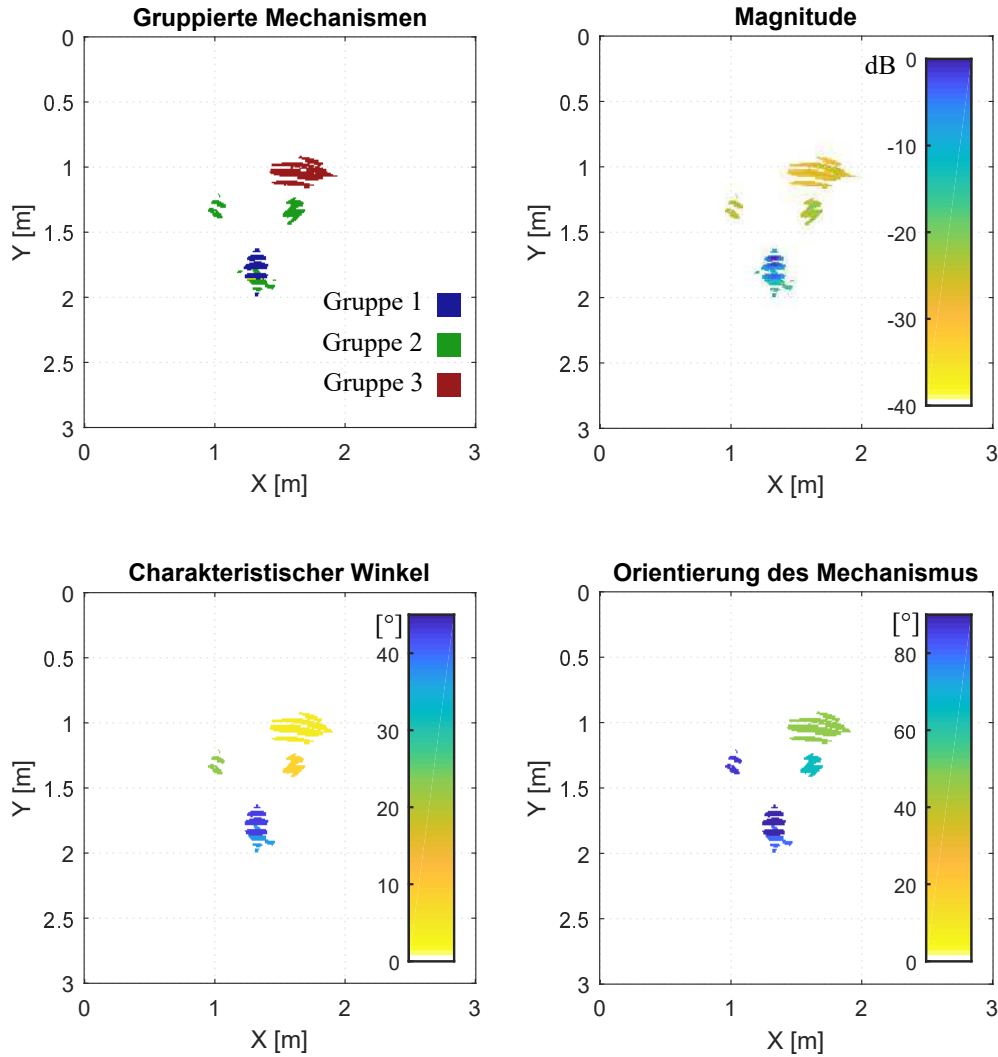
### 5.3.1. Kohärente Zerlegung der Cluster

Abbildung 5.10 zeigt die kombinierten Resultate der auf die einzelnen Objektmodelle bezogenen Bildbereiche. Die Abbildung der gruppierten Mechanismen kennzeichnet dabei die räumliche Lage der 6 extrahierten Cluster, welche in 3 Gruppen ähnlicher polarimetrischer Signatur farblich zusammengefasst wurden. Somit handelt es sich in der Darstellung um die in Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.9 gezeigten Bildgebungsresultate, wobei eine Begrenzung der dargestellten Amplituden auf den Bereich zwischen 0 dB und -10 dB je Cluster vorgenommen wurde.

Anhand des in Gleichung 2.22 eingeführten Modells eines Streumechanismus auf Grundlage der Rotation einer diagonalisierten Streumatrix um die Orientierung  $\psi$ , können die mittleren polarimetrischen Signaturen der Cluster hinsichtlich ihrer kohärenten Rückstreuung untersucht werden. Neben der Ausrichtung des Mechanismus kann die Polarisationsselektivität jedes Clusters durch den charakteristischen Winkel  $\gamma$  beschrieben werden.  $\psi$  ist dabei der Winkel der in Gleichung 5.4 verwendeten Rotationsmatrix, welcher zu einer Diagonalisierung der mittleren Streumatrix eines Clusters führt.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Die auf der Hauptdiagonalen befindlichen Eigenwerte  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ , mit



**Abbildung 5.10.:** Analyse der Resultate der Verbundzerlegung: Die Entfernungszellen der Cluster wurden genutzt, um für jeden Cluster einen mittleren Parameter für Magnitude, Art und Orientierung des dominanten Mechanismus zu berechnen.

$|\lambda_1| > |\lambda_2|$ , können anschließend zur Identifikation eines Dipolmechanismus gemäß Gleichung 5.5 verwendet werden. Polarisationsselektive Mechanismen ergeben dabei einen charakteristischen Winkel von  $\gamma \approx 0$ .

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{|\lambda_2|}{|\lambda_1|} \quad (5.5)$$

In Abbildung 5.10 werden die unterschiedlichen Magnituden der Rückstreuvorgänge verdeutlicht, welche normiert im Bereich von 0 dB bis -35 dB auftreten. Der charakteristische Winkel ergibt für den gedrehten Stab und die rechte Kante des Reflektors Werte von  $\gamma < 10^\circ$ , womit die Mechanismen deutlich einem Dipol zugeordnet werden können. Neben der mit  $\gamma > 40^\circ$  gekennzeichneten Doppelreflexion, kommt es bei den verbleibenden Rückstreuungen der linken Kante und der vertikalen Ecke des Reflektors zu Überlagerungen mit Wand- oder Doppelreflexionsmechanismen, wodurch sich deren Polarisationsselektivität verringert. Bei der Orientierung der Mechanismen zeigen sich die vertikalen oder  $90^\circ$  ausgerichteten Objektbestandteile der Doppelreflexion und Kanten mit Werten von  $\psi > 80^\circ$  mit Ausnahme der rechten vom Stab abgeschatteten Kante des Reflektors. Diese wird durch Interaktion des ein- und ausfallenden Wellenfeldes mit dem davor platzierten  $45^\circ$  orientierten Objekt beeinflusst.

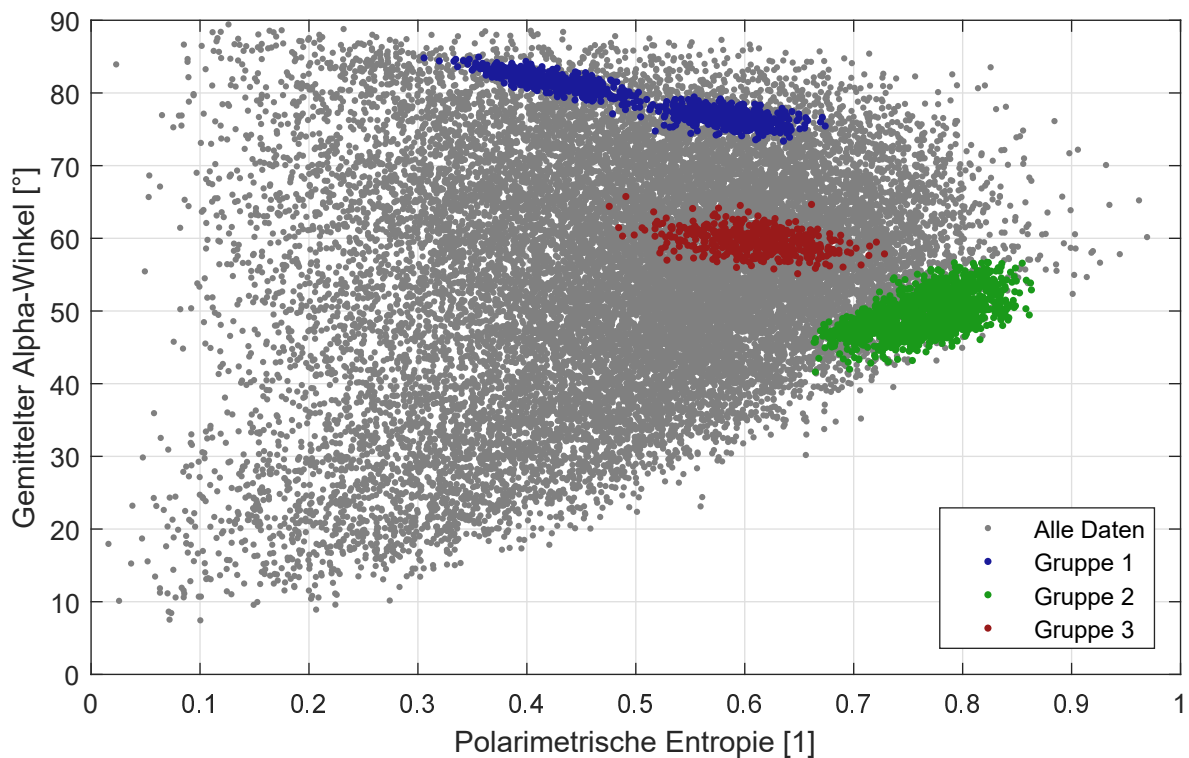
Insgesamt kann eine weitere Informationsebene neben der räumlichen Zuordnung der Streumechanismen geschaffen werden, da die angewandte iterative Zerlegung nicht nur die Identifikation der Mechanismen im Bildbereich verbessert, sondern ebenso deren polarimetrische Auswertung ermöglicht. Die durchgeführte Analyse ist lediglich als Beispiel des breiten Spektrums kohärenter Zerlegungsmethoden zu betrachten, welche auf die mittlere Signatur jedes Clusters angewendet werden kann. Anhand einiger Cluster kann jedoch von einer Überlagerung mehrerer Streumechanismen ausgegangen werden. In diesem Fall bietet die Nutzung inkohärenter Verfahren ein weiteres Werkzeug zur Analyse der Zusammensetzung der Cluster.

### 5.3.2. Inkohärente Zerlegung der Cluster

Dazu findet die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellte Eigenwert-Eigenvektor-Zerlegung und anschließende Extraktion der polarimetrischen Entropie und des Alpha-Winkels Anwendung. Zur Bildung der mittleren Kohärenzmatrix  $\mathbf{T}$  wurden  $N$  Streumatrizen zufällig aus einem Cluster ausgewählt und in einen Pauli-Vektor gemäß Gleichung 2.31 umgewandelt. Daraus ergeben sich  $N$  Vektoren, welche gemäß Gleichung 2.32 jeweils eine Kohärenzmatrix bilden und gemittelt werden. Eine anschließende Eigenwertzerlegung von  $\mathbf{T}$  ermöglicht somit gemäß Gleichung 2.44 und Gleichung 2.45 die Bestimmung von Entropie und Alpha-Winkel für die vorgenommene zufällige Auswahl von Entfernungszellen. Durch mehrfache Wiederholung dieses Vorgangs ergeben sich für jeden Cluster mehrere Punkte in der in Abbildung 5.11 dargestellten Entropie-Alpha-Ebene.

In der grau hinterlegten Gesamtheit der Entfernungszellen, befinden sich die Punktwolken der einzelnen Cluster-Gruppen in unterschiedlichen Bereichen der Ebene. Aufgrund der hohen Anzahl an Mittelungen bei der Erstellung der Kohärenzmatrix sind die absoluten Werte der Entropie mit einem Offset im Vergleich





**Abbildung 5.11.:** Informationsgewinnung aus den Resultaten der Verbundzerlegung: Mithilfe der Entropie-Alpha-Zerlegung wurden verschiedene Stichproben der mittleren statistischen Parameter für Art und Zufälligkeit des Mechanismus berechnet. Als Referenz sind die Parameter für die Gesamtheit der Messdaten in grau hinterlegt.

zum klassischen 9-Zonen-Modell der Fernerkundung versehen. Aus der relativen Lage zueinander lassen sich dennoch Informationen über die zugrundeliegenden Entfernungszellen ableiten. So ist Gruppe 1 (Doppelreflektor) durch geringere Entropie und mittlere Alpha-Werte über  $80^\circ$  gekennzeichnet. Dadurch wird der deterministische Charakter der Rückstreuung und das Vorhandensein von Mehrfachreflexionen abgebildet. Anhand der Teilung der Gruppe in einen Teil geringerer und höherer Entropie lässt sich die Vermutung ableiten, dass der dominante Mechanismus der Doppelreflexion aus einigen Aspektwinkeln von anderen Mechanismen überlagert wird. Dies könnte auf eine teilweise Abschattung des Reflektors durch den vor der rechten Kante platzierten gedrehten Stab zurückzuführen sein.

Gruppe 2 und 3 weisen eine höhere Entropie und demnach eine höhere Zufälligkeit der Rückstreuung auf. Dies ist zunächst auf die geringe Magnitude der Dipolmechanismen zurückzuführen, da eine zusätzliche Überlagerung bspw. mit dem Wandmechanismus der Flächen des Reflektors oder der dominanten Doppelreflexion überproportionalen Einfluss auf die Gestalt der Streumatrix nimmt. Der gerin-

gere Alpha-Winkel zwischen  $40^\circ$  und  $60^\circ$  deutet auf einen polarisationsselektiven Vorgang wie einen Dipolmechanismus hin, welcher für die vertikalen Kanten des Reflektors und den gedrehten Stab zutreffend ist.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Bereich der Fernerkundung stellt die Radar-Polarimetrie seit vielen Jahren wertvolle Methoden zur Verfügung, welche auf die Rekonstruktion der Rückstreuungsvorgänge an beleuchteten Objekten abzielen und eine detaillierte Ableitung ursächlicher Eigenschaften ermöglichen als monopolarimetrische Verfahren. Zur Anwendung kommen dabei je nach Anzahl überlagerter Mechanismen eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren, welche in Kapitel 2 thematisiert wurden. Im Zentrum der Auswertung steht die Zerlegung einer beobachteten Streumatrix in kanonische Streumechanismen, wobei eine gewisse Isolation der sich überlagernden Rückstreuungsvorgänge vorausgesetzt wird. Bildgebungsverfahren erfüllen diese Anforderung durch räumliche Fokussierung der Rückstreuung in Bildbereichen, welche anschließend polarimetrisch ausgewertet werden.

Für die Erkundung des Nahbereichs mittels breitbandiger Radar-Sensoren wurden in den letzten Jahren zahlreiche bildgebende Verfahren erforscht, welche der Kartierung von Umgebungen oder der Untersuchung von Objekten dienen. Unterschiede in der Beleuchtungsgeometrie und den Randbedingungen der Szenarien begründen zahlreiche Abweichungen zur Fernerkundung, welche in Kapitel 3 eingeordnet wurden. Polarimetrische Radar-Daten werden in diesem Zusammenhang wie in der Fernerkundung als Information des Bildbereichs behandelt, wodurch Zerlegungs- und Klassifikationsverfahren als Nachverarbeitungsschritt der Bildgebung folgen.

Aus modellbasierten UWB-Bildgebungsalgorithmen sind die Vorteile einer Zerlegung der Radar-Daten in die verschiedenen Signalkomponenten der Rückstreuobjekte bekannt und werden zur Reduzierung von Bildartefakten und Mehrdeutigkeiten genutzt. Die grundsätzliche Vorgehensweise begründet sich aus der Selektion ausgewählter Entfernungszellen, welche anhand ihrer Verzögerungszeiten bspw. mittels Detektion einer Wellenfront gewonnen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses Konzept auf die polarimetrische Signatur der Rückstreuobjekte erweitert, um polarimetrische Informationen für den Bildgebungsvorgang nutzbar zu machen.

Dazu thematisiert Kapitel 4 zwei Methoden, welche im Rahmen des zugrundeliegenden Forschungsvorhabens entwickelt wurden. In beiden Fällen steht die Gruppierung ähnlicher Rückstreuobjekt-komponenten im Zentrum der Untersuchungen. Auf Grundlage synthetischer Radar-Daten wird zunächst die Möglichkeit der Zerlegung durch Filterung bestimmter Signaturen im Zeitbereich betrachtet, um

---

Rückstreuikomponenten voneinander zu trennen und separat einer Bildgebung zuzuführen. Die grundsätzliche Modellierung der Radar-Daten in Form einer multivariaten Mischverteilung wird im zweiten Verfahren für eine unüberwachte Klassifikation der Zeitbereichsdaten verwendet. Ein iteratives Vorgehen bei der Auswertung der Radar-Daten in Zeit- und Bildbereich ermöglicht eine Analyse der einzelnen Rückstreuikomponenten in inkrementellen Schritten. Die angewandte Methodik wurde anschließend in Kapitel 5 anhand realer Messdaten verifiziert und ausführlich diskutiert.

Zentrales Anliegen dieser Arbeit war die Erschließung polarimetrischer Analysemethoden für eine Integration in den Bildgebungsvorgang. Breitbandige Radar-Signale erlauben die Trennung einzelner Rückstreumechanismen bereits im Zeitbereich, da die benötigte Auflösung der Radar-Daten in Entfernungsrichtung besteht. Es konnte gezeigt werden, dass eine Separierung von Signalkomponenten anhand ihrer polarimetrischen Signaturen vorteilhafte Einflüsse auf die Qualität der nachfolgenden Bildgebungsergebnisse nimmt, da störende Bildartefakte und Mehrdeutigkeiten verringert werden.

Anhand polarisationsselektiver Objekte bzw. winkelabhängiger Rückstreueigenschaften wurde zudem verdeutlicht, dass konventionelle Bildgebungsverfahren irreversible Verfälschungen der polarimetrischen Signatur im Bildbereich hervorrufen können. Eine Rekonstruktion solcher Projektionen erfordert daher neben einer dualpolarisierten Sensoranordnung an Sender und Empfänger eine Berücksichtigung der auftretenden Effekte vor der Integration der Zeitbereichsdaten im Bildgebungsvorgang.

Maßgeblicher Beitrag dieser Arbeit zum Stand der Forschung besteht somit in der Zusammenführung von Verfahren der klassischen Radar-Polarimetrie der Fernerkundung und Methoden der UWB-Bildgebung im Nahbereich. Dazu wurde eine Methodik der modellbasierten Zerlegung der Umgebung in Einzelabbildungen gewählt, wobei sich die zugrundeliegenden Objektmodelle aus polarimetrischen Signaturen ergeben. Für bildgebende Anwendungen breitbandiger Radar-Sensorik ergibt sich jedoch die allgemeine Erkenntnis, dass eine Berücksichtigung polarimetrischer Informationen als Vorverarbeitung der Bildgebung als vorteilhaft und in einigen Fällen sogar als notwendig angesehen werden muss.

Einige Teilaspekte realistischer Szenarien wurden in dieser Arbeit zur Vereinfachung der Informationsgewinnung vernachlässigt, wodurch sich nachfolgende Forschungsaktivitäten ableiten lassen. Mit voranschreitender Automatisierung in Verkehr, Logistik oder Industrie wird die Sensordichte und das Bedürfnis nach Umgebungsinformationen in Zukunft noch deutlich gesteigert werden. Sowohl für bildgebende Verfahren, Lokalisierungssysteme als auch für klassische Aufgaben der Radar-Polarimetrie stellen komplexe Randbedingungen der Geometrie und

---

Dynamik der Szenarien eine Herausforderung für zukünftige Analyseverfahren dar.

Mit zunehmender Kooperation der Radar-Sensoren werden bistatische Beleuchtungsgeometrien eine wichtigere Rolle in Anwendungen einnehmen, als es aktuell der Fall ist. Durch den Wegfall einer symmetrischen Streumatrix ergeben sich automatisch neue Freiheitsgrade in der Interpretation polarimetrischer Rückstreuung. Jedoch erwachsen daraus hohe Anforderungen an die Kenntnis der getrennten Koordinatensysteme von Sendern und Empfängern und eine Erweiterung der Konzepte polarimetrischer Zerlegungsverfahren.

In dynamischen Szenarien, wie es bspw. für die Fahrzeugsensorik der Fall ist, stellt die Verarbeitung zeitvarianter Rückstreubedingungen und Beleuchtungsgeometrien eine erhebliche Herausforderung für die Interpretation von Radar-Signalen dar. Bezogen auf die Auswertbarkeit polarimetrischer Signaturen stellt sich die Frage nach der Abbildung inhärenter Bewegungsabläufe von Umgebungsbestandteilen in die beobachteten Streumatrizen und polarimetrischen Parameter.

---

## Publikationen mit eigener Beteiligung

Zur Einordnung der Publikationen wird im folgenden eine Übersicht der Veröffentlichungen und eine kurze Erklärung des eigenen Beitrags gegeben.

**M. Röding, R. Zetik, R. S. Thomä:** „Polarimetric target discrimination for ultrawideband radar imaging“, *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 751-755, Mai 2015

Konzept der Anwendung polarimetrischer Zerlegung als Vorverarbeitung zur UWB-Bildgebung; Radar-Messungen und erste Resultate durch Zerlegung der Kovarianzmatrix; Vorarbeiten zur Zeitbereichszerlegung (Abschnitt 4.2)

**M. Röding, R. S. Thomä:** „Polarimetric covariance matrix processing for target discrimination in time domain“, *2015 16th International Radar Symposium (IRS)*, pp. 888-893, Juni 2015

Detektion ausgewählter Streumechanismen in Zeitbereichsdaten; Verifikation durch strahlenbasierte Simulationsumgebung und Integration numerisch bestimmter RCS-Daten; Untersuchung der statistischen Verteilung der Radar-Daten; polarimetrische Zeitbereichszerlegung von UWB-Daten (Abschnitt 4.2)

**J. Luo, R. S. Thomä, D. Dupleich, M. Röding, S. Häfner, R. Müller, C. Schneider, D. Schulz:** „Analog Beamforming Devices“, Patentanmeldung, *Veröffentlichungsnummer: WO2017025116A1*, Anmeldedatum: 07.08.2015, Veröffentlichungsdatum: 16.02.2017, Status: Angemeldet

Untersuchung des Einflusses von Rückstreuobjekten auf die polarimetrischen Eigenschaften von Ausbreitungspfaden im mm-Wellen-Bereich; Möglichkeiten der Kompensation von Änderungen des Polarisationszustands in zukünftigen Kommunikationssystemen

**M. Röding, R. S. Thomä:** „Exploiting polarimetric radar cross section characteristics for clustering of ultrawideband radar signals“, *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 232-236, April 2016

Unüberwachte Klassifikation / Clustering zur Zerlegung polarimetrischer Radardaten; Iterative Verbundzerlegung im Zeit- und Bildbereich (Abschnitt 4.3); Radar-Messungen und Anwendung des Klassifikationsverfahrens als Vorverarbeitung der Bildgebung

**M. Röding, T. Dallmann, R. S. Thomä, D. Heberling:** „Bistatic imaging of linear structures for polarimetric ultrawideband radar“, *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 444-448, Mai 2016

Untersuchungen von Projektionseffekten des Streumechanismus von kanonischen Objekten insb. bei bistatischen Radar-Anwendungen (Abschnitt 2.2.4);

---

Entwicklung eines modellbasierten Verfahrens zur Kompensation von Projektionen bei polarisationsselektiven Objekten (Drähte, Kanten)

**T. Dallmann, M. Röding, R. S. Thomä, D. Heberling:** „A small-angle approximation for bistatic polarimetry“, *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 111-115, Mai 2016  
Diskussion des Einflusses des bistatischen Winkels auf monostatische Analysemethoden

**G. Sommerkorn, S. Häfner, M. Röding, R. S. Thomä:** „Synthesis of Realistic Bistatic Range Profiles“, *European Cooperation in Science and Technology (EURO-COST)*, COST Action CA15104 IRACON, pp. 21-26, Februar 2017  
Untersuchung des Konzepts einer Simulationsumgebung zur Integration gemessener RCS Daten in Kanalimpulsantworten

**M. Röding, G. Sommerkorn, S. Häfner, R. Müller, R. S. Thomä, J. Goerlich, K. Garhammer:** „Fully Polarimetric Wideband RCS Measurements for Small Drones“, *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 331-335, April 2017  
Durchführung und Auswertung von bistatischen, polarimetrischen RCS-Messungen kleiner Drohnen; Extraktion schwacher Rückstreukomponenten durch Reduzierung statischer Signalkomponenten

**M. Röding, G. Sommerkorn, S. Häfner, A. Ihlow, S. Jovanoska, R. S. Thomä:** „ARC<sub>4</sub><sup>2</sup> - A Double Arch Positioner for Bistatic RCS Measurements with Four Degrees of Freedom“, *2017 14th European Radar Conference (EuRAD)*, pp. 161-165, Oktober 2017  
Untersuchung des Konzepts einer Positioniereinrichtung zur vollautomatischen Messung der bistatischen, polarimetrischen RCS; Durchführung von Voruntersuchungen und Begleitung der Konstruktionsphase





# Anhang



# A. Anhang - Grundlegende Definitionen

## Lineare Algebra

### Adjungierte Matrix

Die adjungierte Matrix  $\mathbf{A}^H$  ist die Transponierte und komplex Konjugierte der Matrix  $\mathbf{A}$ .

### Hermiteische Matrix

$\mathbf{A}$  ist eine hermitesche Matrix, wenn sie identisch ihrer adjungierten Matrix  $\mathbf{A}^H$  ist.

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^H \quad (\text{A.1})$$

Hermiteische Matrizen sind demnach quadratisch und besitzen reelle Elemente auf der Hauptdiagonalen. Von besonderer Bedeutung für die Radar-Polarimetrie ist die Eigenschaft der Diagonalisierbarkeit und das Vorhandensein reeller Eigenwerte.

### Unitäre Matrix

$\mathbf{U}$  ist eine unitäre Matrix wenn das Produkt mit ihrer adjungierten Matrix die Identitätsmatrix ergibt.

$$\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \mathbf{I} \quad (\text{A.2})$$

Daraus ergibt sich, dass die Inverse  $\mathbf{U}^{-1}$  identisch der Adjungierten ist. Die Gruppe unitärer  $2 \times 2$  Matrizen, welche die Determinante  $\det(\mathbf{U}) = 1$  besitzen, bezeichnet man als spezielle unitäre Gruppe  $SU(2)$ . Besonders aufgrund ihrer Eigenschaften die euklidische Norm von Vektoren, welche mit  $\mathbf{U}$  multipliziert werden, zu erhalten, stellen unitäre Matrizen die Basis für die Transformation von Vektorräumen dar.

---

## Ähnlichkeit und Diagonalisierbarkeit

Wenn gilt dass

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}_2 \mathbf{B}, \quad (\text{A.3})$$

dann sind die Matrizen  $\mathbf{A}_1$  und  $\mathbf{A}_2$  ähnlich zueinander.  $\mathbf{A}_1$  und  $\mathbf{A}_2$  sind dabei quadratische Matrizen.

---

## Differentialoperatoren

Sämtliche Operatoren sind in kartesischen Koordinaten beschrieben. Für die Darstellung in Zylinder- oder Kugelkoordinaten kann [140] herangezogen werden.

### Gradient

Für ein Skalarfeld  $s(x, y, z)$  beschreibt dessen Gradient  $\text{grad}(s)$  den Anstieg des Skalarfeldes in Richtung der Einheitsvektoren  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$  und  $\mathbf{e}_z$  in Form eines Vektorfeldes  $\mathbf{V}$  ((A.4)).

$$\mathbf{V} = \text{grad} = \frac{\partial s}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial s}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial s}{\partial z} \mathbf{e}_z \quad (\text{A.4})$$

### Divergenz

Für ein Vektorfeld  $\mathbf{V} = v_x(x, y, z)\mathbf{e}_x + v_y(x, y, z)\mathbf{e}_y + v_z(x, y, z)\mathbf{e}_z$  wird dessen Divergenz  $\text{div}(\mathbf{V})$  als Skalar der partiellen Ableitung an einem Punkt beschrieben ((A.5)).

$$s = \text{div}\mathbf{V} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (\text{A.5})$$

### Rotation

Für ein Vektorfeld  $\mathbf{V} = v_x(x, y, z)\mathbf{e}_x + v_y(x, y, z)\mathbf{e}_y + v_z(x, y, z)\mathbf{e}_z$  wird dessen Rotation  $\text{rot}(\mathbf{V})$  als Vektorfeld  $\mathbf{F}$  beschrieben, dessen Komponenten aus den partiellen Ableitungen von  $\mathbf{V}$  gebildet werden ((A.6)).

$$\mathbf{F} = \text{rot}(\mathbf{V}) = \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \mathbf{e}_x + \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \mathbf{e}_y + \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \mathbf{e}_z \quad (\text{A.6})$$

### Nabla-Operator

Für ein Skalarfeld  $s(x, y, z)$  oder ein Vektorfeld  $\mathbf{V} = v_x(x, y, z)\mathbf{e}_x + v_y(x, y, z)\mathbf{e}_y + v_z(x, y, z)\mathbf{e}_z$  dient der Nabla-Operator  $\nabla$  der kompakten Formulierung der partiellen Ableitungen entlang der Einheitsvektoren  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$  und  $\mathbf{e}_z$  (Gleichung A.7).

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{e}_z \quad (\text{A.7})$$

Die Differentialoperatoren  $\text{grad}$ ,  $\text{div}$  und  $\text{rot}$  ergeben sich damit in kompakter Schreibweise.

$$\text{grad}(s) = \nabla s \quad (\text{A.8})$$

$$\text{div}(\mathbf{V}) = \nabla \cdot \mathbf{V} \quad (\text{A.9})$$

$$\text{rot}(\mathbf{V}) = \nabla \times \mathbf{V} \quad (\text{A.10})$$

---

## Laplace-Operator

Für ein Skalarfeld  $s(x, y, z)$  oder ein Vektorfeld  $\mathbf{V} = v_x(x, y, z)\mathbf{e}_x + v_y(x, y, z)\mathbf{e}_y + v_z(x, y, z)\mathbf{e}_z$  ergibt sich der Laplace-Operator  $\Delta$  als Verknüpfung der Differentialoperatoren grad, div und rot gemäß Gleichung A.11 und Gleichung A.12.

$$\Delta s = \text{div}(\text{grad}(s)) \quad (\text{A.11})$$

$$\Delta \mathbf{V} = \text{grad}(\text{div}(\mathbf{V})) - \text{rot}(\text{rot}(\mathbf{V})) \quad (\text{A.12})$$

---

# Elektrodynamik

## Materialgleichungen

In allgemeiner Form liegen die Materialkonstanten in räumlich und zeitlich veränderlicher Form für isotrope Medien vor.

Elektrische Stromdichte	$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \sigma(\mathbf{r}, t) * \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$	
Elektrische Flussdichte	$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \epsilon(\mathbf{r}, t) * \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$	(A.13)
Magnetische Flussdichte	$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu(\mathbf{r}, t) * \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$	

In vielen Anwendungsfällen besteht die Annahme homogener Medien und die Betrachtung einer einzelnen Frequenz, wodurch eine vereinfachte Beschreibung der Materialgleichungen ermöglicht wird.

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

## Maxwellsche Gleichungen in Differentialform

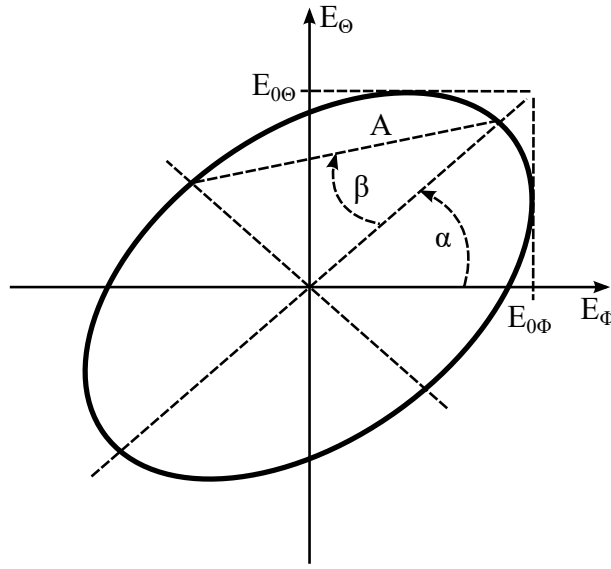
Faradaysches Induktionsgesetz	$\text{rot}(\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$	
Ampèresches Durchflutungsgesetz	$\text{rot}(\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)) = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$	(A.15)
Gaußsches Gesetz	$\text{div}(\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)) = \rho(\mathbf{r}, t)$	
Gaußsches Gesetz für Magnetismus	$\text{div}(\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)) = 0$	

---

## Radar-Polarimetrie

### Beschreibung des Polarisationszustands

#### Polarisationsellipse



*Abbildung A.1.: Polarisationsellipse:  $A$  - Amplitude,  $\alpha$  - Orientierung,  $\beta$  - Elliptizität*

#### Jones-Vektor

$$\mathbf{E}_J = Ae^{j\varphi} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta) \\ j \sin(\beta) \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

#### Stokes-Vektor

$$\mathbf{E}_S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^2 \\ A^2 \cos(2\alpha) \cos(2\beta) \\ A^2 \sin(2\alpha) \cos(2\beta) \\ A^2 \sin(2\beta) \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$



---

## Darstellungsformen der Objektrückstreuung

### Sinclair-Matrix bzw. Streumatrix

Die Sinclair-Matrix  $\mathbf{S}$  setzt ein- und ausgehenden Jones-Vektor miteinander in Beziehung.

$$\mathbf{E}_J^{(s)} = \mathbf{S} \mathbf{E}_J^{(i)} \quad (\text{A.18})$$

mit

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{\Phi\Phi} & S_{\Phi\Theta} \\ S_{\Theta\Phi} & S_{\Theta\Theta} \end{bmatrix} \quad (\text{A.19})$$

### Kennaugh-Matrix bzw. Müller-Matrix

Die Müller-Matrix  $\mathbf{M}$  für das Koordinatensystem der Vorwärtsstreuung oder die Kennaugh-Matrix  $\mathbf{K}$  für das Koordinatensystem der Rückwärtsstreuung setzt ein- und ausgehenden Stokes-Vektor miteinander in Beziehung.

$$\mathbf{E}_S^{(s)} = \mathbf{K} \mathbf{E}_S^{(i)} \quad (\text{A.20})$$

mit

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}^* (\mathbf{S} \otimes \mathbf{S}^*) \mathbf{A}^{-1} \quad (\text{A.21})$$

und dem Kronecker-Produkt  $\otimes$  sowie Matrix  $\mathbf{A}$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & j & -j & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

zu

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} A_0 + B_0 & C_\psi & H_\psi & F_\psi \\ C_\psi & A_0 + B_\psi & E_\psi & G_\psi \\ H_\psi & E_\psi & A_0 - B_\psi & D_\psi \\ F_\psi & G_\psi & D_\psi & -A_0 + B_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.23})$$

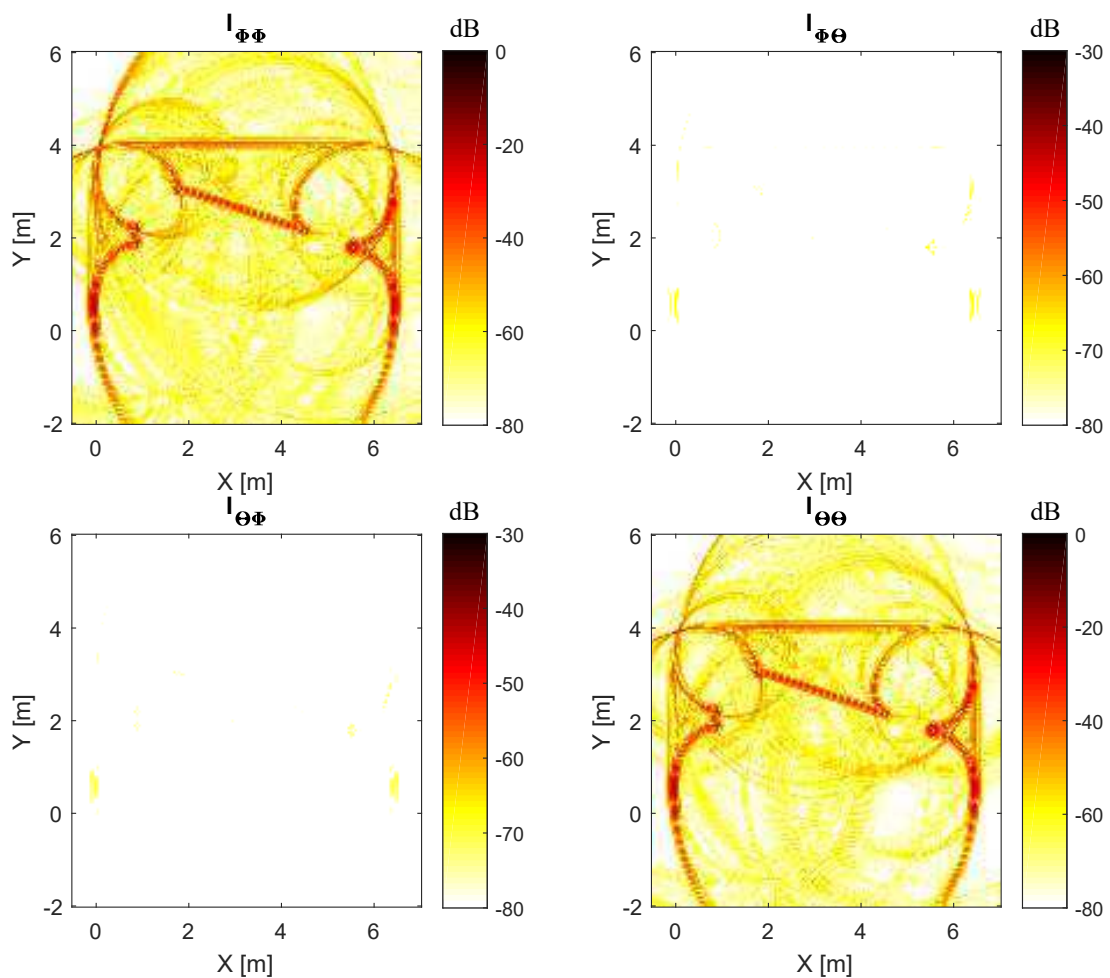
wobei einige Größen von der Rotation des Objekts um die LOS  $\psi$  abhängig sind.



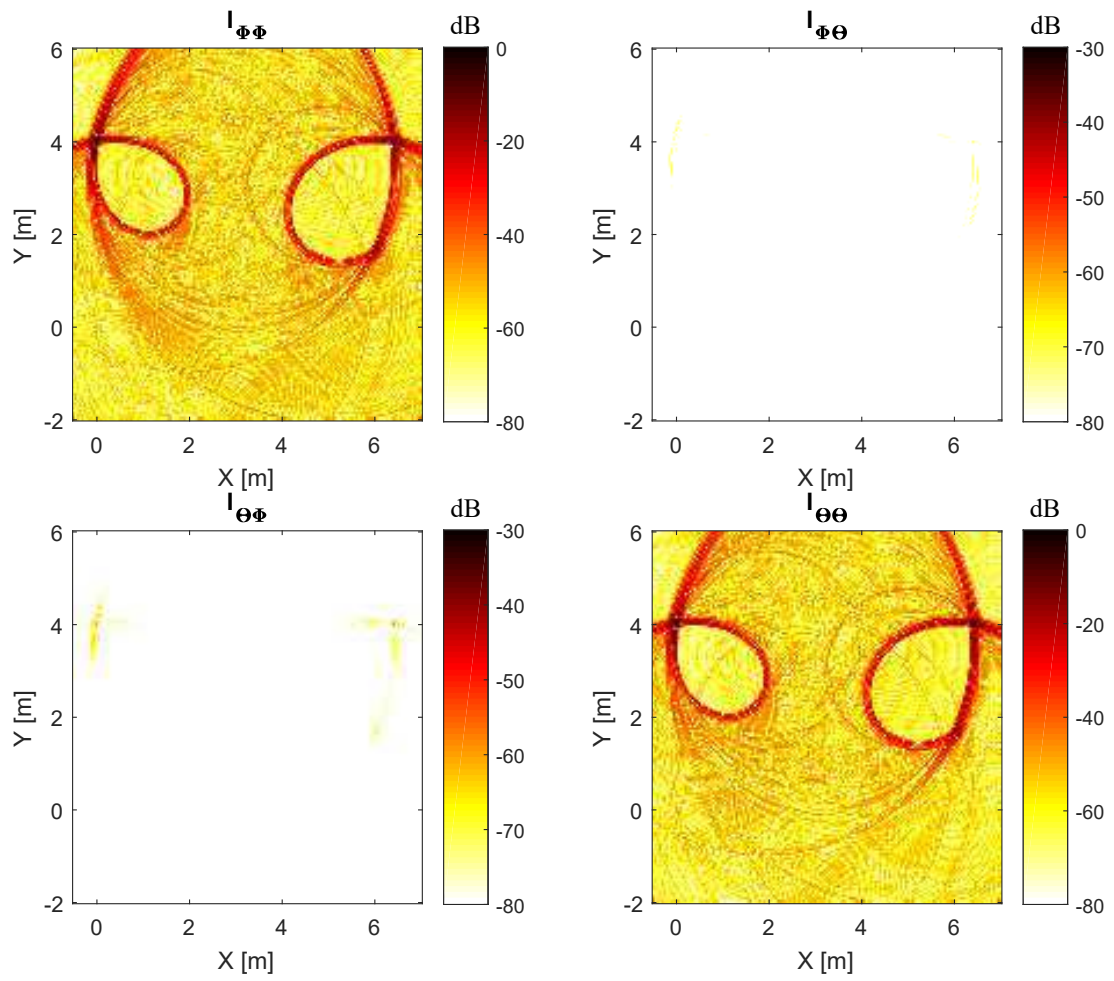
## B. Anhang - Ergänzende Abbildungen

### Zeitbereichszerlegung

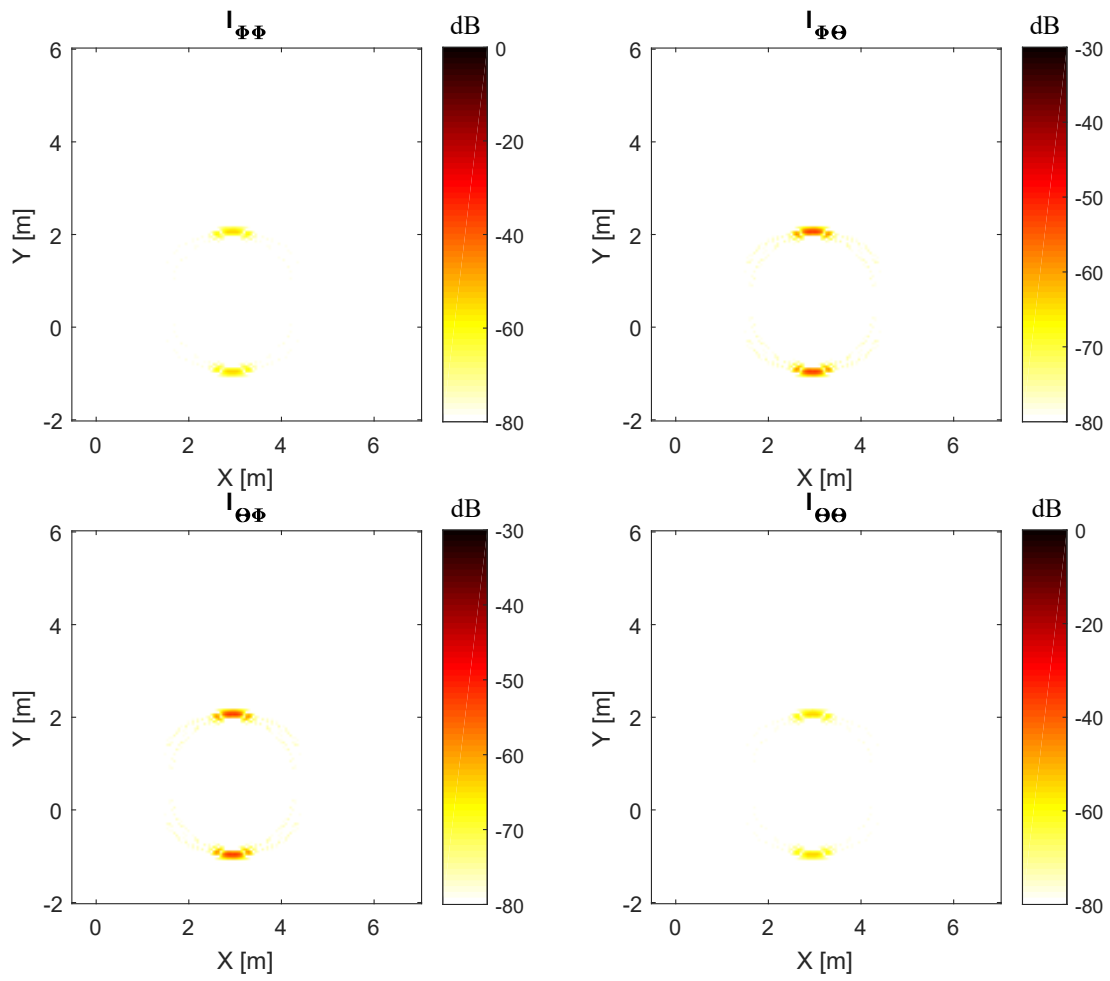
#### Synthetisierte Radar-Daten



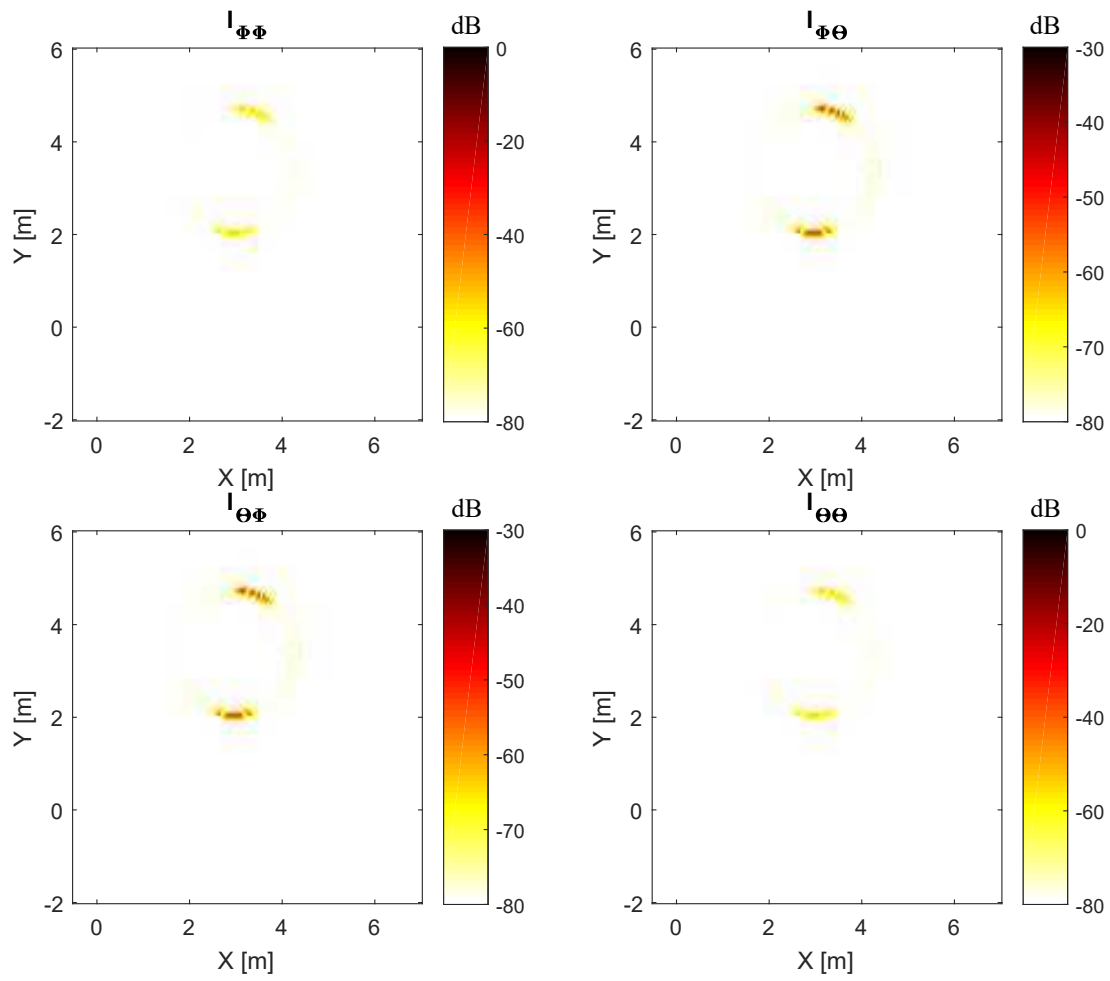
**Abbildung B.1.:** Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche ungeradzahliger Reflexionen.



**Abbildung B.2.:** Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche geradzahlicher Reflexionen.



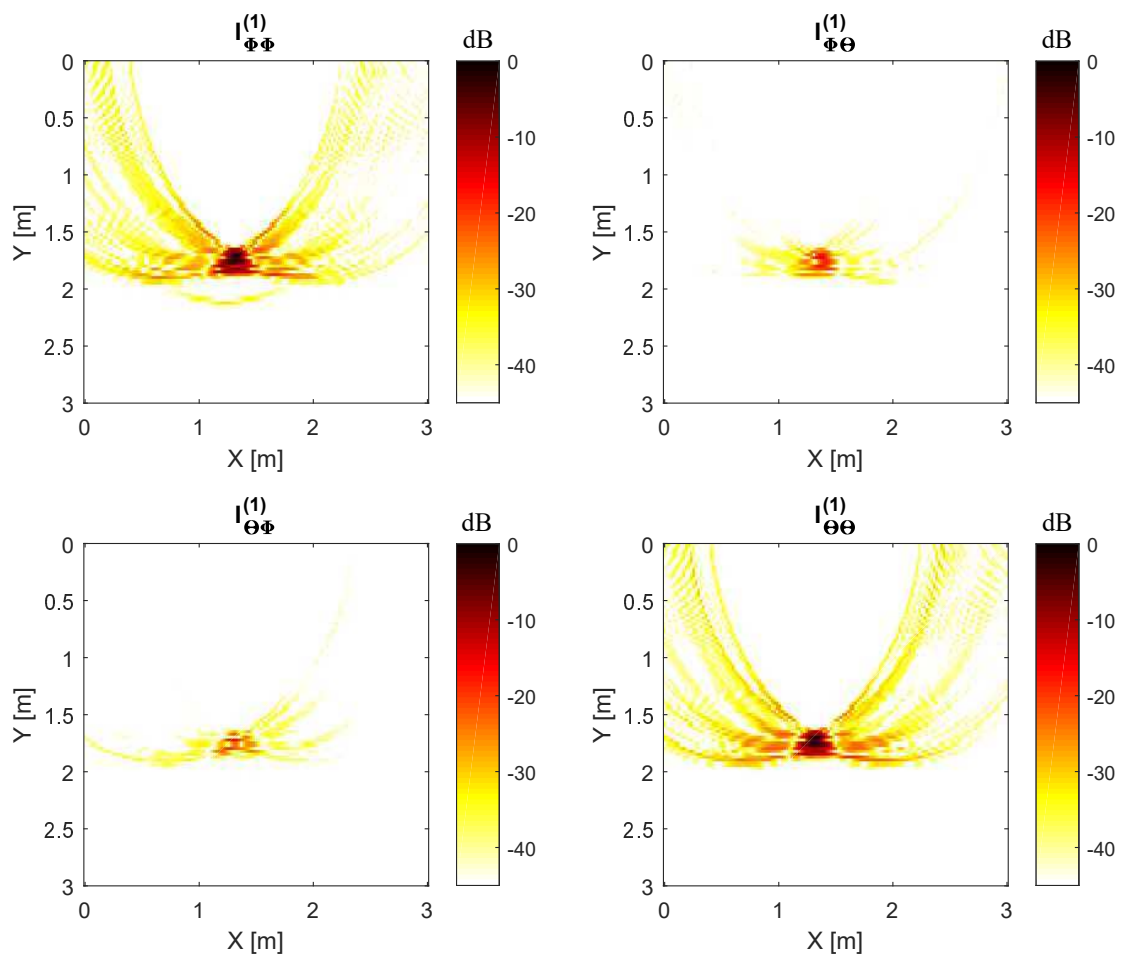
**Abbildung B.3.:** Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von  $45^\circ$ .



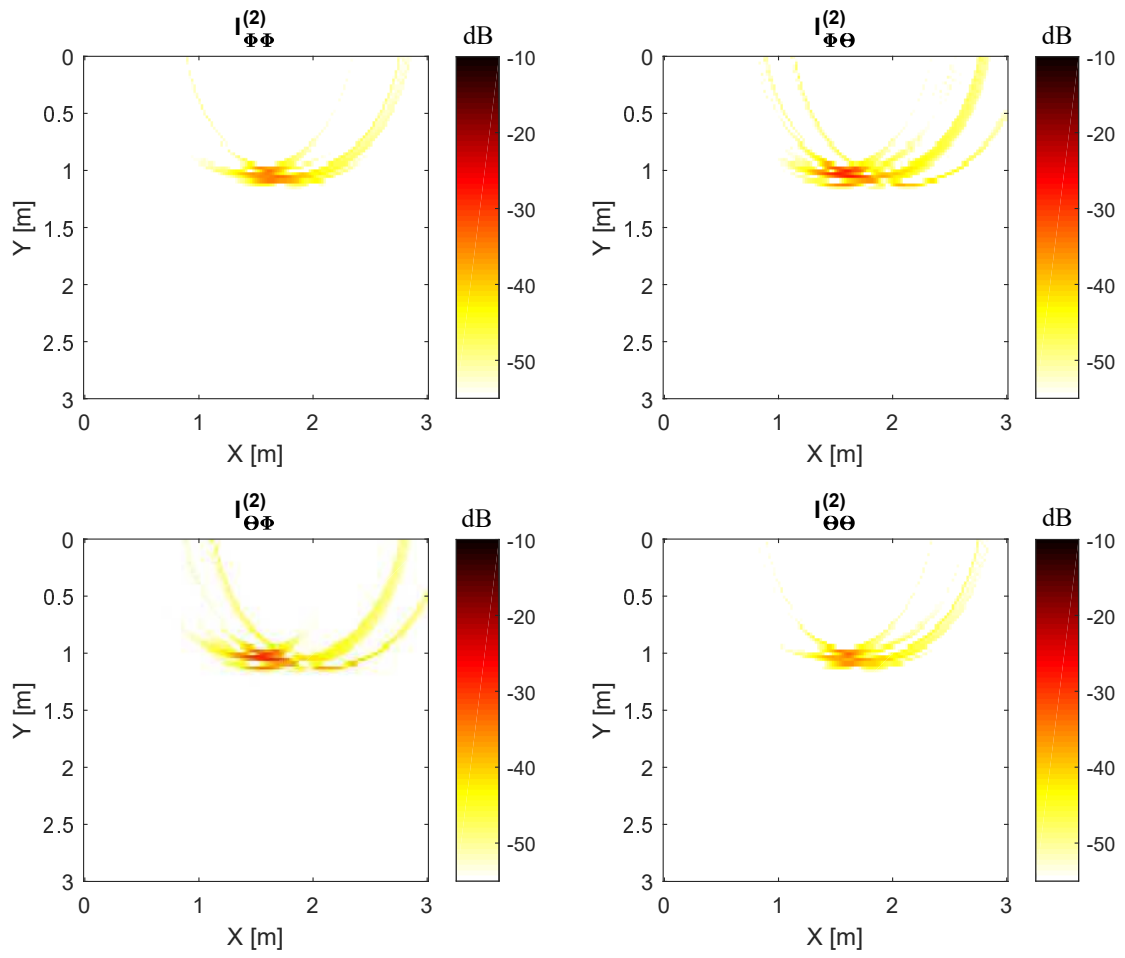
**Abbildung B.4.:** Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von  $-45^\circ$ .

---

## Gemessene Radar-Daten

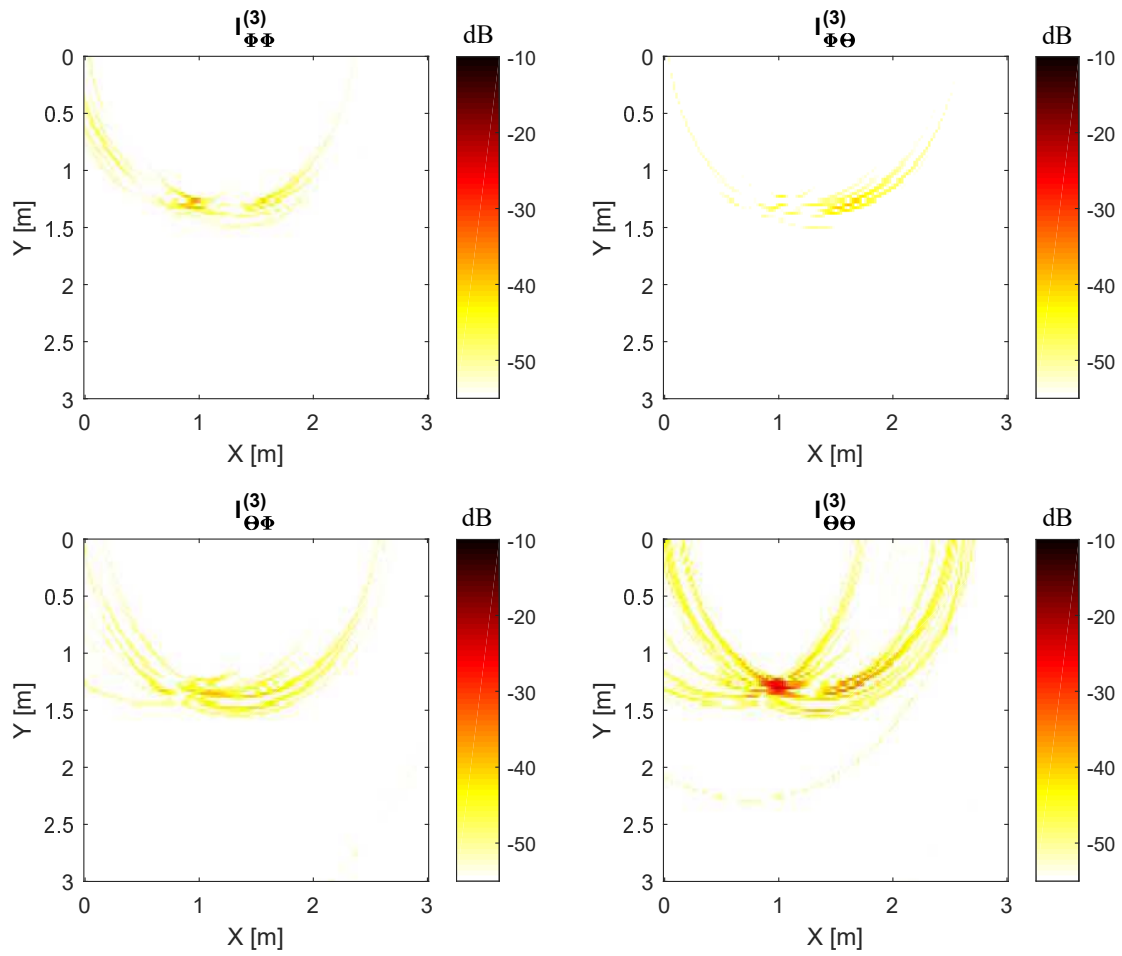


**Abbildung B.5.:** Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche der Rückstreuung des Doppelreflektors.

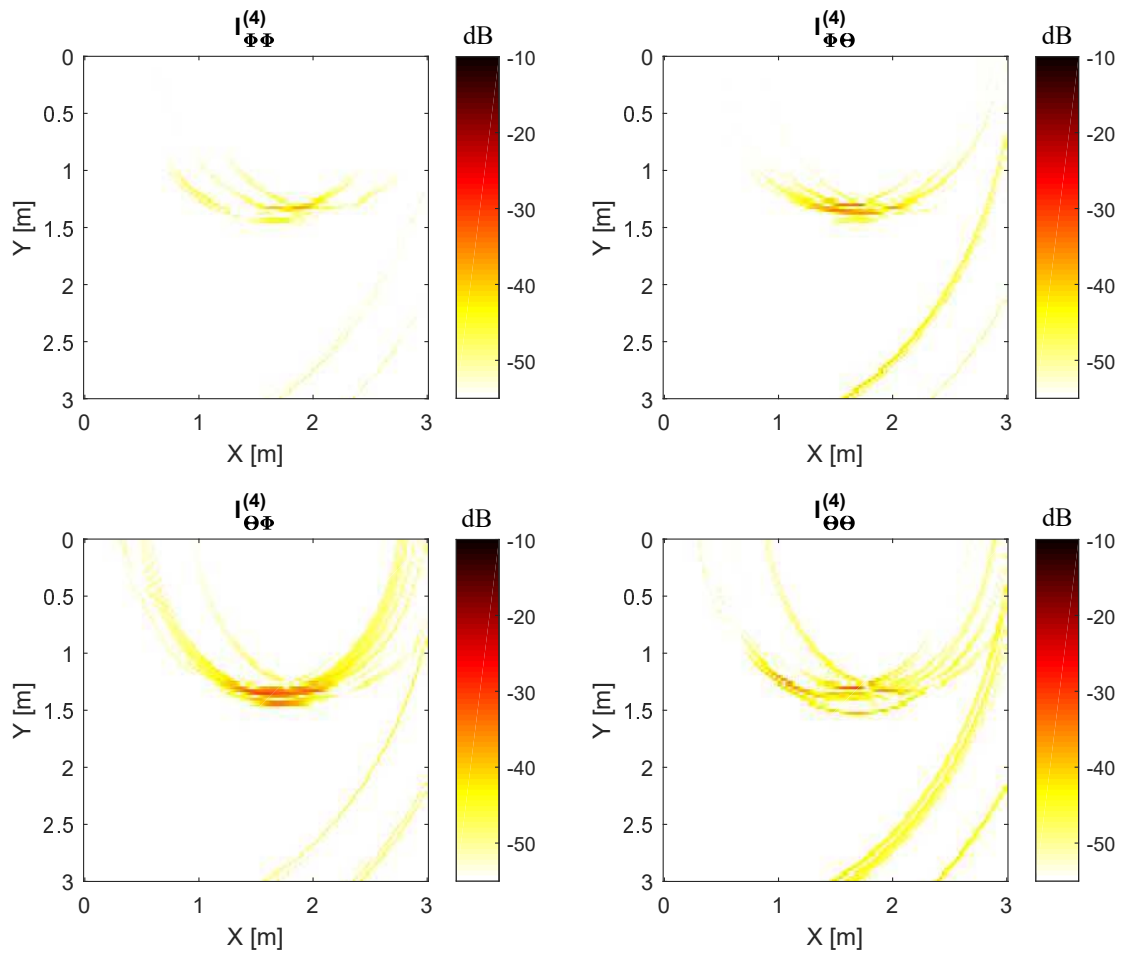


**Abbildung B.6.:** Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche der Rückstreuung des 45° gedrehten Stabs.





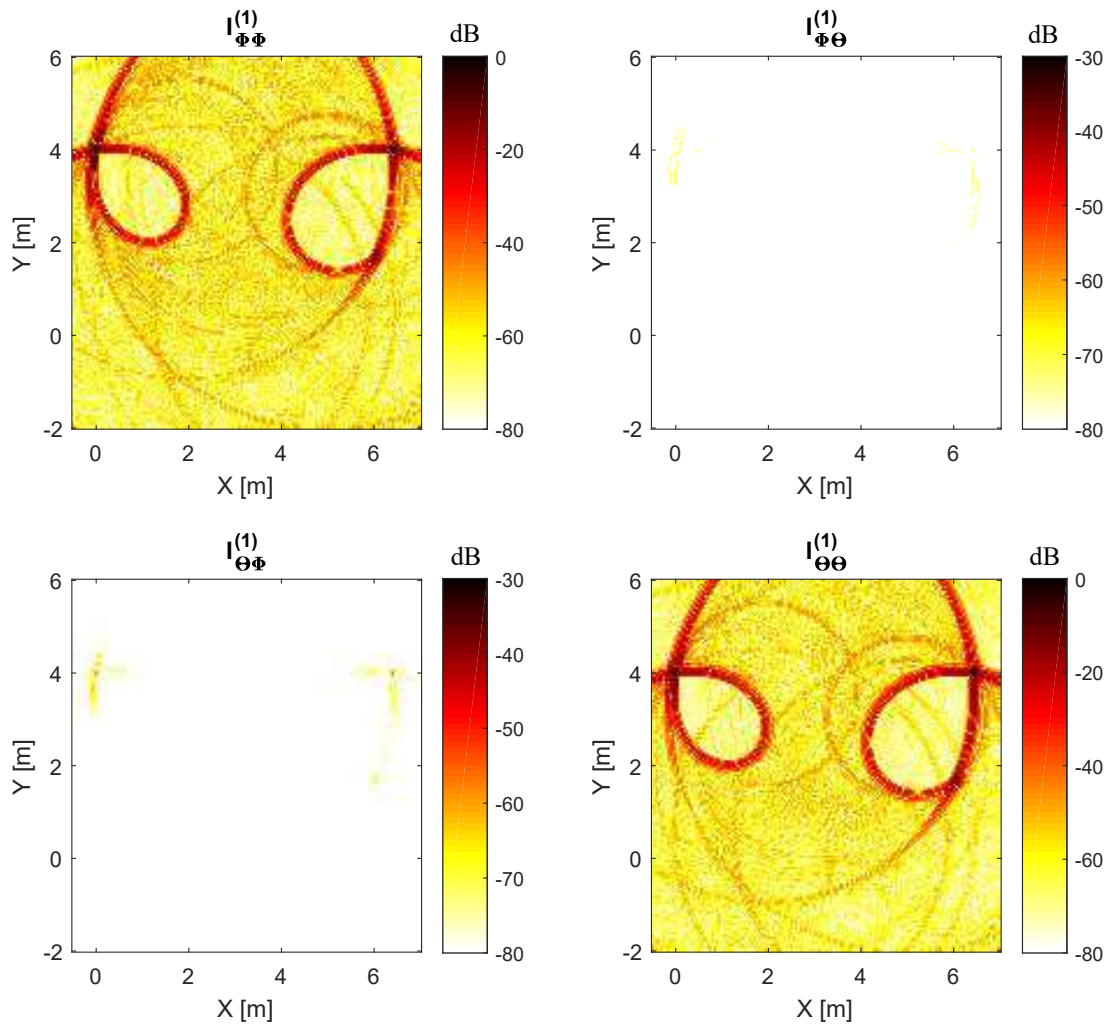
**Abbildung B.7.:** Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche der Rückstreuung der linken Kante des Doppelreflektors.



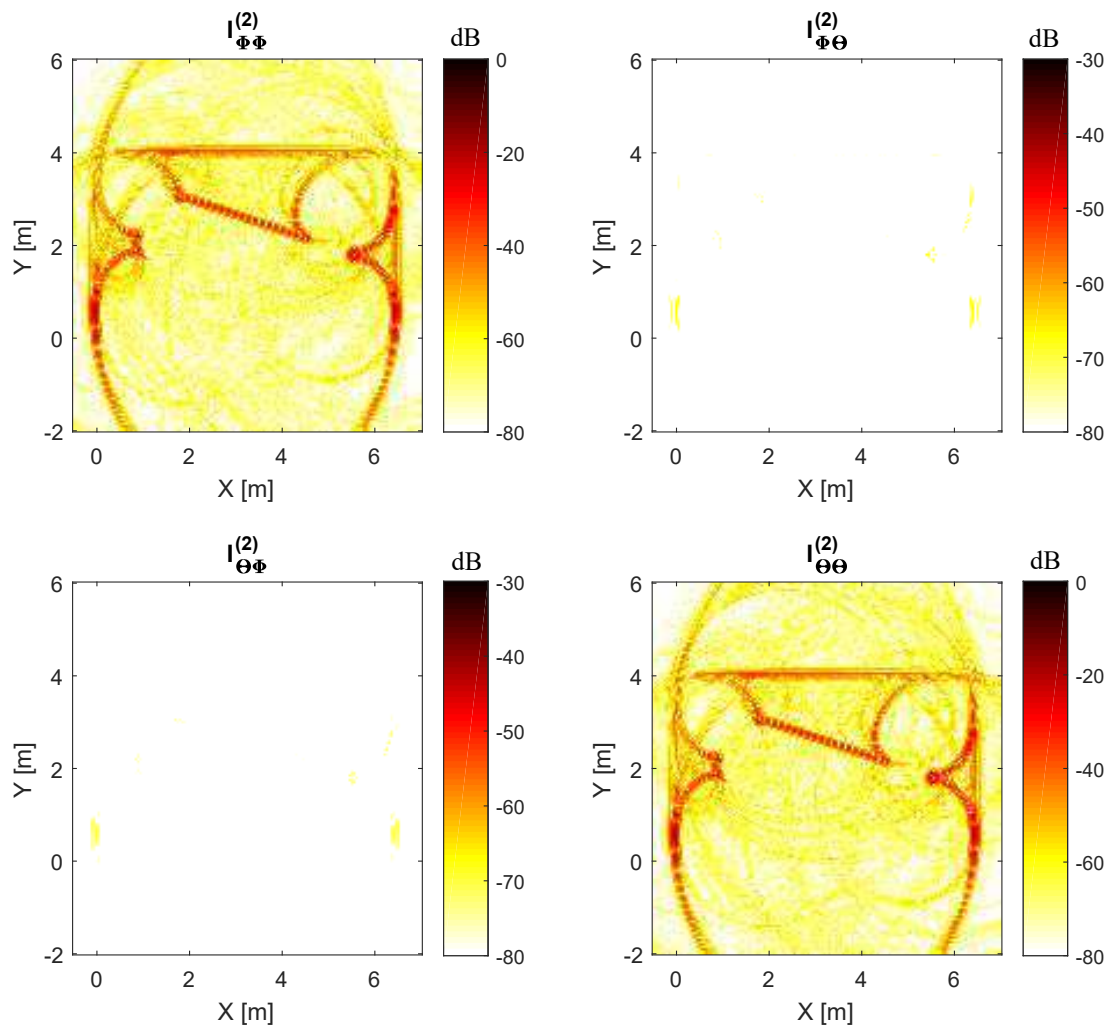
**Abbildung B.8.:** Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche der Rückstreuung der rechten Kante des Doppelreflektors.

---

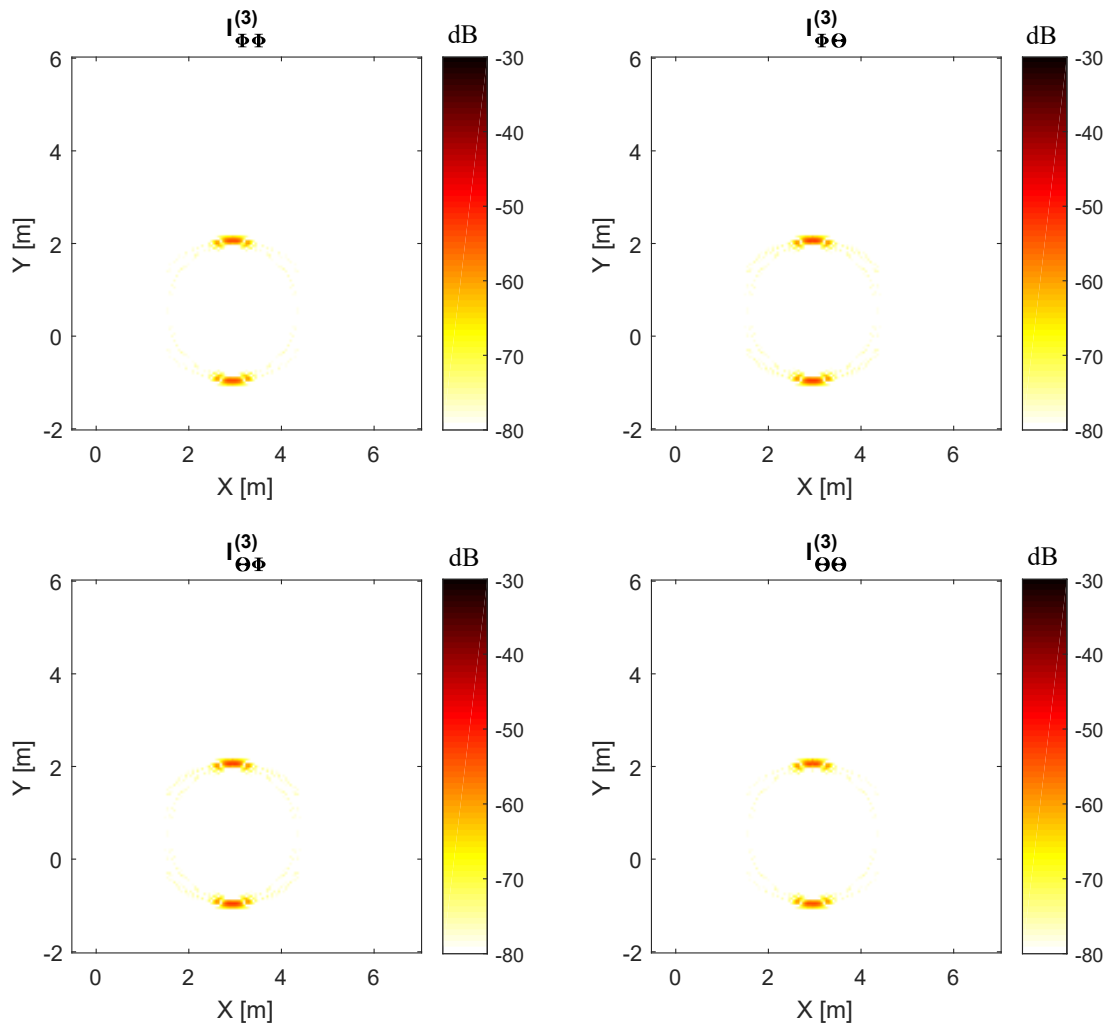
## Iterative Verbundzerlegung von Zeit- und Bildbereichsdaten



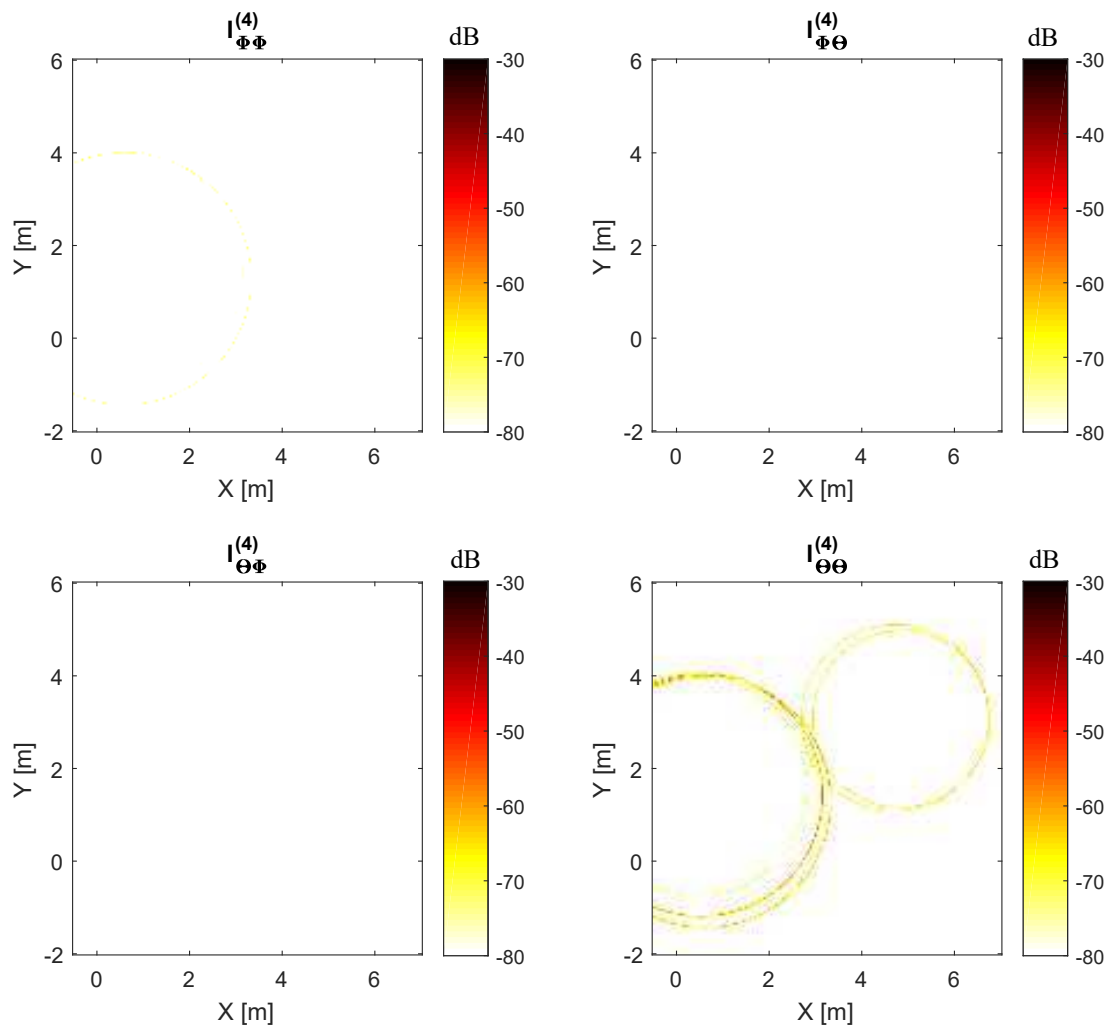
**Abbildung B.9.:** Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 1 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche geradzahliger Reflexionen.



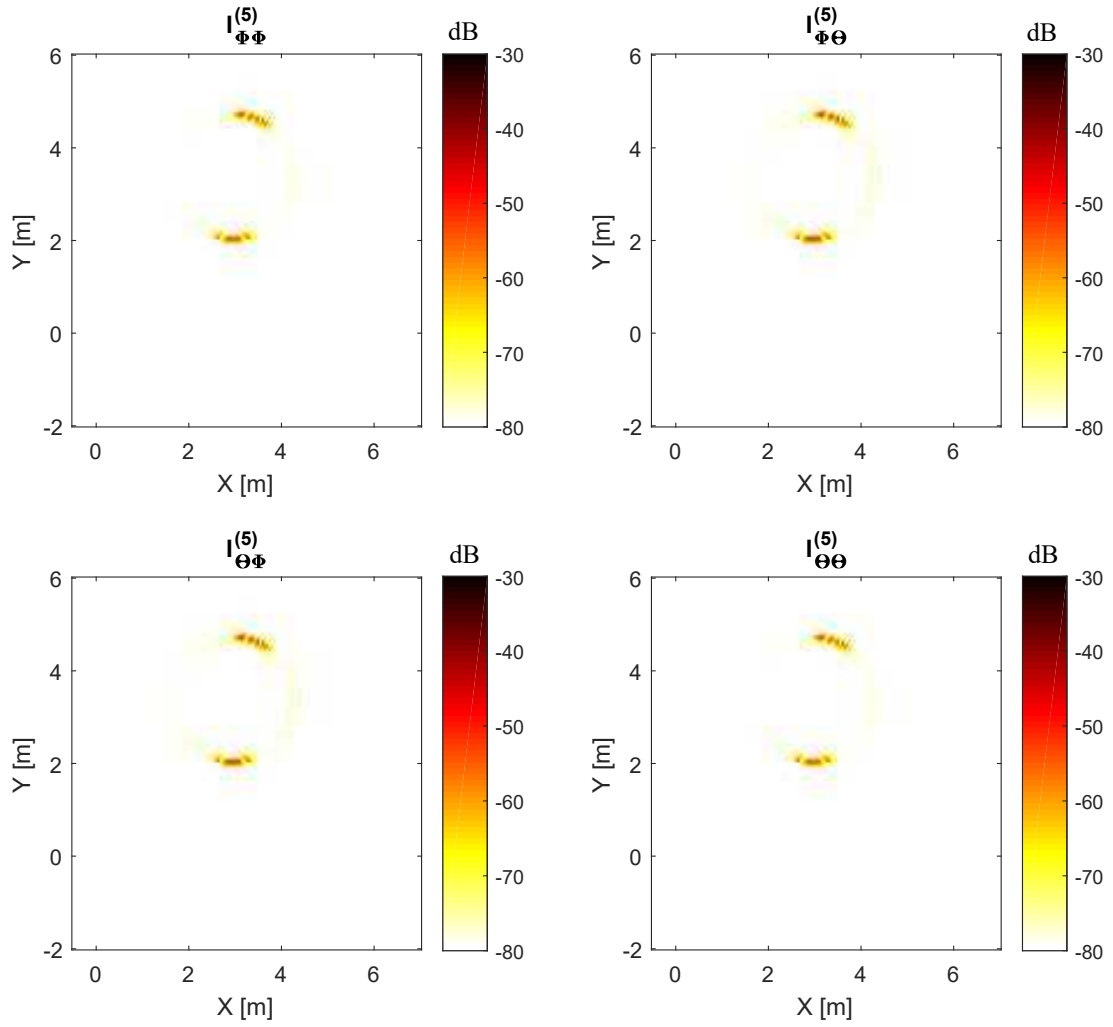
**Abbildung B.10.:** Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 2 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche ungeradzahliger Reflexionen.



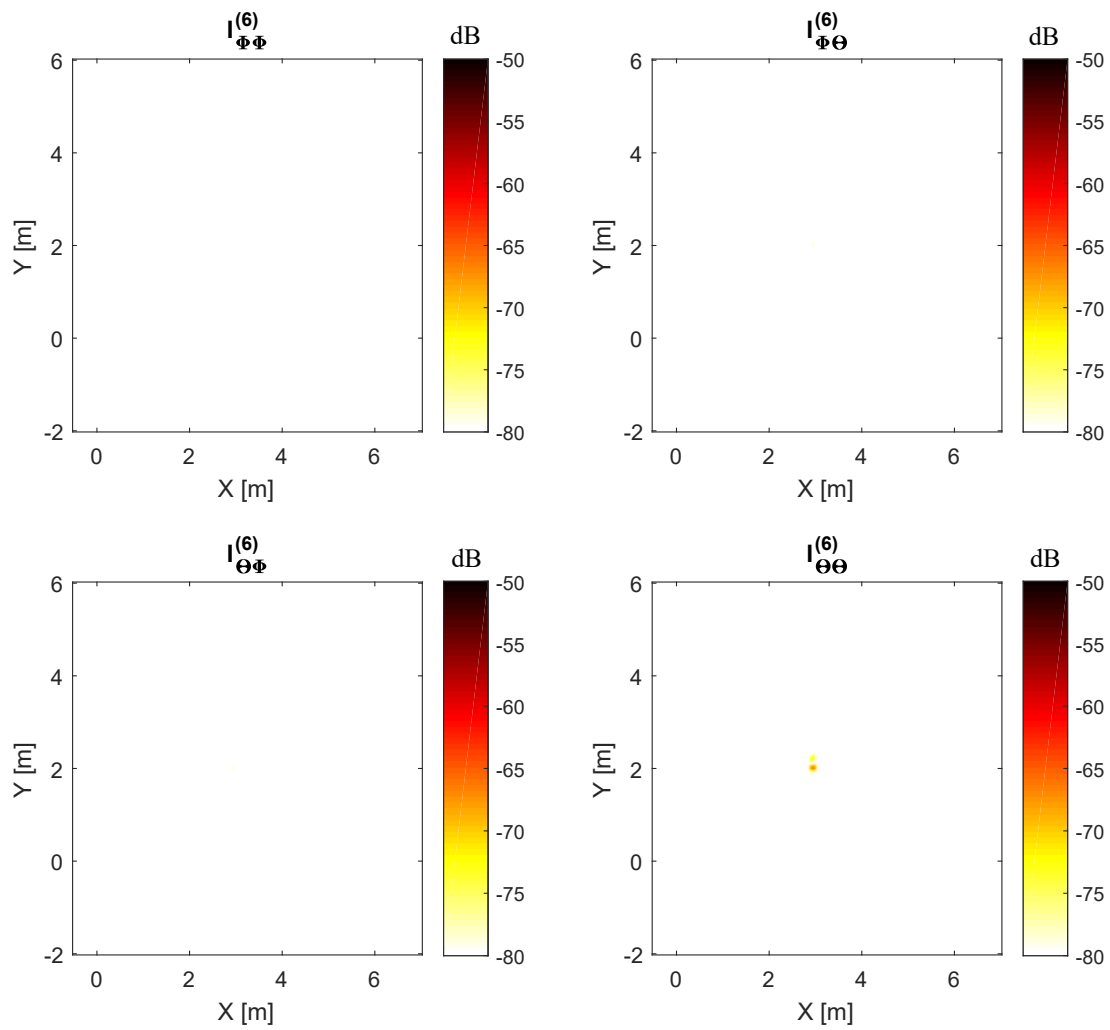
**Abbildung B.11.:** Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 3 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von  $45^\circ$ .



**Abbildung B.12.:** Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 4 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von  $90^\circ$ .



**Abbildung B.13.:** Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 5 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von  $-45^\circ$ .



**Abbildung B.14.:** Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 6 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von  $90^\circ$ .



# Akronyme

<b>Bezeichnung</b>	<b>Beschreibung</b>
EM	engl.: expectation-maximization.
FMCW	engl.: frequency modulated continuous wave.
GMM	engl.: Gaussian mixture model; dt.: Gauß'sche Mischverteilung.
ISAR	engl.: inverse synthetic aperture radar; dt.: Radar mit inverser synthetischer Apertur.
LOS	engl.: line of sight; dt.: direkte Sichtverbindung.
RAR	engl.: real aperture radar; dt.: Radar mit realer Apertur.
RCS	engl.: radar cross section; dt.: Radar-Rückstreuquerschnitt.
Rx	engl.: receiver; dt.: Empfänger.
SAR	engl.: synthetic aperture radar; dt.: Radar mit synthetischer Apertur.
Tx	engl.: transmitter; dt.: Sender.
UWB	engl.: ultra wideband; dt.: ultrabreitband-.
UZS	Uhrzeigesinn.



# Symbole

**Bezeichnung    Beschreibung**

## Allgemeine Notation

$a, b, c$	Skalare.
$\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$	Vektoren.
$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$	Matrizen.
$\mathbf{A}^T$	Transponierte Matrix.
$\mathbf{A}^*$	Komplex konjugierte Matrix.
$\mathbf{A}^H$	Hermiteische Matrix.
$\mathbf{A}^{-1}$	inverse Matrix.
$\Sigma$	allgemeine Diagonalmatrix.
$z(m)$	$z$ in Abhängigkeit der kontinuierlichen Variablen $m$ .
$Z(m, n)$	$Z$ in Abhängigkeit der kontinuierlichen Variablen $m$ und $n$ .
$\mathbf{z}$	Diskretisierte Größe $z$ in Vektorform.
$\mathbf{Z}$	Diskretisierte Größe $Z$ in Matrixform.
$\square^{(i)}$	Hochstellung $(i)$ als Beschreibung einer Eingangs- oder einfallenden Größe.
$\square^{(s)}$	Hochstellung $(s)$ als Beschreibung einer Ausgangs- oder gestreuten Größe.
$E\{\square\}$	Erwartungswert.
$\hat{\square}$	Maximalwert.
$p_X(x_1)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Zufallsgröße $X$ .
$\mathbb{R}^n$	Reeller $n$ -dimensionaler Vektorraum.
$\mathbb{C}^n$	Komplexer $n$ -dimensionaler Vektorraum.
$\Re\{\square\}$	Realteil.
$\Im\{\square\}$	Imaginärteil.
$j$	imaginäre Einheit.

**Bezeichnung    Beschreibung****Orts- und Einheitsvektoren sowie sonstige Symbole**

$\delta$	Dirac-Impuls.
$\omega$	Kreisfrequenz.
$\tau$	Verzögerungszeit.
$c$	Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium.
$f$	Frequenz.
$h$	Impulsantwort eines Filters.
$t$	Zeit.
$\mathbf{r}$	Ortsvektor.
$r$	Betrag des Ortsvektor.
$\mathbf{r}_p$	Ortsvektor des Pixels.
$\mathbf{r}_{Tx}$	Ortsvektor der Sendeantenne.
$\mathbf{r}_{Rx}$	Ortsvektor der Empfangsantenne.
$\mathbf{e}$	Einheitsvektor einer bestimmten Richtung.
$\mathbf{e}_k$	Einheitsvektor des Wellenvektors.
$\mathbf{e}^{(i)}$	Einheitsvektor der einfallenden Richtung.
$\mathbf{e}^{(s)}$	Einheitsvektor der gestreuten Richtung.
$\mathbf{e}_x$	Einheitsvektor kartesischer Koordinaten in x-Richtung.
$\mathbf{e}_y$	Einheitsvektor kartesischer Koordinaten in y-Richtung.
$\mathbf{e}_z$	Einheitsvektor kartesischer Koordinaten in z-Richtung.
$\mathbf{e}_r$	Einheitsvektor räumlicher Polarkoordinaten in Radialrichtung.
$\mathbf{e}_\Phi$	Einheitsvektor räumlicher Polarkoordinaten in Azimutrichtung.
$\mathbf{e}_\Theta$	Einheitsvektor räumlicher Polarkoordinaten in Elevations- oder Polarrichtung.

**Feldgrößen und Differentialoperatoren**

div	Divergenz.
-----	------------

Bezeichnung	Beschreibung
rot	Rotation.
$\Delta$	Laplace-Operator, siehe (A.11), (A.12).
$\nabla$	Nabla-Operator, siehe (A.7).
grad	Gradient.
$\mathcal{E}$	Elektrische Feldstärke.
$\mathcal{H}$	Magnetische Feldstärke.
$\mathcal{D}$	Elektrische Flussdichte.
$\mathcal{B}$	Magnetische Flussdichte.
$\mathcal{J}$	Verschiebungsstrom.
$\epsilon$	Permittivität.
$\epsilon_0$	Elektrische Feldkonstante.
$\mu$	Magnetische Permeabilität.
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante.
$\sigma$	Konduktivität.
$\mathbf{k}$	Wellenvektor.
$k$	Betrag des Wellenvektors.
$k_0$	Wellenzahl.
$\rho$	Elektrische Ladungsdichte.
$E_\Phi$	Komponente der elektrische Feldstärke in Azimutrichtung.
$\varphi_E$	Phase der elektrischen Feldstärke.
$E_{0\Phi}$	Maximalamplitude der Komponente der elektrische Feldstärke in Azimutrichtung.
$\varphi_\Phi$	Phase der Komponente der elektrische Feldstärke in Azimutrichtung.
$E_\Theta$	Komponente der elektrische Feldstärke in Elevationsrichtung.
$E_{0\Theta}$	Maximalamplitude der Komponente der elektrische Feldstärke in Elevationsrichtung.
$\varphi_\Theta$	Phase der Komponente der elektrische Feldstärke in Elevationsrichtung.
$E_k$	Komponente der elektrische Feldstärke in Ausbreitungsrichtung.
$\Delta\varphi$	Phasendifferenz der orthogonalen Komponenten der elektrische Feldstärke.

---

**Bezeichnung    Beschreibung**
**Symbole der Bildgebung und Polarimetrie**

$A_{HA\bar{\alpha}}$	Polarimetrische Anisotropie.
$A$	Amplitude der Polarisationsellipse.
$H_{HA\bar{\alpha}}$	Polarimetrische Entropie.
$I$	Bildbereichsfunktion.
$M$	Messdaten / Radargramm.
$P_i$	Pseudo-Wahrscheinlichkeit.
$S_n$	n-ter Stokes-Parameter.
$\alpha$	Orientierung der Polarisationsellipse.
$\beta$	Elliptizität der Polarisationsellipse.
$\chi$	Euler-Parameter: Winkel der Helizität.
$\gamma$	Euler-Parameter: charakteristischer Winkel.
$C$	Polarimetrische Kovarianzmatrix.
$E_J$	Jones-Vektor.
$E_S$	Stokes-Vektor.
$F$	polarimetrische Merkmalsmatrix.
$H$	Helizitätsmatrix.
$I$	Bilddaten.
$K$	Kennaugh-Matrix.
$M$	Datenmatrix.
$R$	Rotationsmatrix.
$S_D$	Diagonalisierte Streumatrix.
$S$	Polarimetrische Streumatrix.
$T$	Polarimetrische Kohärenzmatrix.
$U$	Unitäre Matrix.
$\mathbf{b}_{Ref}$	polarimetrischer Referenzvektor / Basisvektor.
$\mathbf{f}$	polarimetrischer Merkmalsvektor.
$\mathbf{s}_P$	Pauli-Streuvektor.
$\mathbf{s}$	Streuvektor.
$\nu$	Euler-Parameter: Reflexionswinkel (skip angle).
$\bar{\alpha}_{HA\bar{\alpha}}$	Mittlerer Alpha-Winkel.
$\psi$	Euler-Parameter: Winkel der Orientierung.
$\varphi$	Absolute Phase der Komponenten des Jones Vektors.

<b>Bezeichnung</b>	<b>Beschreibung</b>
$i_p$	Integrationsresultat.
$m_S$	Euler-Parameter: Magnitude des Mechanismus.
$m$	Radarsignal.
$w$	Wichtungsfunktion.





# Abbildungsverzeichnis

1.1. Szenarien bildgebender Radar-Fern- und -Nahbereichserkundung: Die Transformation der Radar-Daten in den Bildbereich (orange) dient der Abbildung der beleuchteten Umgebung und der Lokalisie- rung von Rückstreueobjekten. Aufgrund unterschiedlicher geometri- scher und systembezogener Parameter bestehen jedoch große Unter- schiede in der Zusammensetzung der Radar-Daten und der enthalte- nen Informationen. . . . .	2
2.1. Polarisationsellipse zur Veranschaulichung des Polarisationszu- stands des elektrischen Felds: $A$ - Amplitude, $\alpha$ - Orientierung, $\beta$ - Elliptizität . . . . .	9
2.2. Rückstreugeometrie gemäß der physikalischen Wellenausbreitung: Die lokalen Koordinatensysteme entsprechen dem Bezugssystem der Vorwärts-Streuung. . . . .	12
2.3. Kanonische Objekte (1) . . . . .	15
2.4. Kanonische Objekte (2) . . . . .	16
2.5. Veranschaulichung der Projektion eines Zylinders in Sende- und Empfangsebene der Antennen. . . . .	18
2.6. Veranschaulichung der Berechnung der polarimetrischen Kovarianz- matrix: Die Wahl der Mittelungsdimension sowie die Anzahl der Mit- telungen sind Freiheitsgrade bei der Bestimmung der mittleren Ko- varianzmatrix. . . . .	23
3.1. Klassische SAR-Bildgebung mit luft- oder raumgestützter Plattform: Kreise gleicher monostatischer Zielentfernung (grün) und Hyperbeln gleicher Dopplerverschiebung (rot) am Boden bilden die Grundlage zur Transformation der Radardaten in den Bildbereich (umrahmt). . .	38
3.2. Bildgebungskonfigurationen des TerraSAR-X Satelliten des Deut- schen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Quelle: DLR (CC- BY 3.0) . . . . .	39
3.3. Bildgebungsszenario der seismischen Exploration: Entlang der Erd- oberfläche erfassen akustische Sende-Empfangsknoten gestreute Si- gnale, um Volumen unterschiedlicher Ausbreitungsbedingungen zu identifizieren. . . . .	40

3.4. Bildgebungsszenario breitbandiger Radar-Sensorik im Nahbereich: Ein bewegter Sensor erfasst an Zeitpunkten $t_1$ bis $t_N$ Impulsantworten, welche unter Nutzung der gebildeten synthetischen Apertur eine Abbildung der Umgebung ermöglichen. Aufgrund der geometrischen Konstellation beinhalten die Radar-Daten zahlreiche Rückstreuikomponenten verschiedener Objekte und Mehrwegepfade. Außerdem nimmt der räumliche Aspektwinkel zum Pixel eventuell Einfluss auf den beobachteten Rückstreumechanismus. . . . .	43
3.5. Blockdiagramm bildgebender Signalverarbeitung nach <i>Sachs</i> [85]: Ziel der Bildgebung ist die Kompensation von Ausbreitungsphänomenen, um eine kohärente Integration der Messdaten der einzelnen Sensorpositionen sicherzustellen. Das Integrationssignal $i_p(t)$ wird bei vollständiger Kompensation maximiert und trägt zur Pixelintensität bei. . . . .	45
3.6. Blockschaltbild modellbasierter bildgebender Signalverarbeitung: Rückstreumodelle verteilter Objekte fließen in die Filterfunktion $h_\eta$ ein. Geometrische Aspekte der Sensoranordnung werden durch eine ortsabhängige Wichtungsfunktion $w$ umgesetzt. Weiterhin können die statistischen Eigenschaften des Bildbereichs durch Anpassung der Kombinationsfunktion $K$ modifiziert werden. . . . .	49
3.7. Schematische Darstellung der allgemeinen Signalverarbeitungsschritte der Radar-Polarimetrie. Bildgebende Verfahren werden im Allgemeinen getrennt von der polarimetrischen Analyse betrachtet. Zerlegungs- und Klassifikationsverfahren werden daher auf polarimetrische Pixel im Bildbereich angewendet. . . . .	54
4.1. Simulationsszenario: Ein monostatischer Sensor bewegt sich durch eine von drei Wänden begrenzte Umgebung um ein Objekt herum. Die Rückstreuung von Wänden, Ecken und dem $45^\circ$ geneigten Stab, wurde anhand von RCS-Simulationen synthetisiert. . . . .	56
4.2. Synthetisierte Radardaten der Geometrie aus Abbildung 4.1 . . . . .	58
4.3. Bildgebungsergebnis: Mithilfe der Kirchhoff Migration wurden die Zeitbereichsdaten in den Bildbereich transformiert. Als Grundlage dienen synthetisierte Radardaten, welche verschiedene Objekte mit dazugehörigen Rückstreumechanismen beinhalten. Die Bewegung des Sensor ist anhand der gestrichelten Linie nachvollziehbar. . . . .	59
4.4. Schematische Darstellung der allgemeinen Signalverarbeitungsschritte der UWB-Radar-Polarimetrie. Daten aus Mess- und Bildbereich werden anhand ihrer polarimetrischen Informationen ausgewertet, um die Interpretierbarkeit zu erhöhen. . . . .	62

4.5. Blockschaltbild bildgebender Signalverarbeitung mit polarimetrischer Datenselektion: Die Wichtungsfunktion $w$ ist abhängig vom Ergebnis der Projektion des Merkmalsvektors der Entfernungszelle $\mathbf{f}_n(t)$ auf den Referenzvektor $\mathbf{b}_{Ref}$ . . . . .	65
4.6. Veranschaulichung der Projektion der Merkmalsvektoren: Jeder Punkt im Datenraum repräsentiert den Merkmalsvektor einer Entfernungszelle. Die zu unterscheidenden Mechanismen sind in hell- und dunkelblau gekennzeichnet. Rote Entfernungszellen beinhalten lediglich Rauschen. Die Orthogonalprojektion der Merkmalsvektoren auf $\mathbf{b}_{Ref}$ transformiert die multivariate Verteilung in ein binäres Entscheidungsproblem. . . . .	67
4.7. Projektionsergebnisse der polarimetrischen Signaturen: Jede Abbildung zeigt die Projektion der Radar-Daten auf unterschiedliche Basisvektoren, welche einer anschließenden Detektion der jeweiligen Entfernungszellen für ungeradzahlige (1), geradzahlige (2) Reflexionen und zwei Aspektwinkel des Dipoles (3)&(4) dienen. . . . .	69
4.8. Kopolare Simulationsdaten nach Detektion der Einzelmechanismen für ungeradzahlige (1), geradzahlige (2) Reflexionen und zwei Aspektwinkel des Stabs (3) & (4). In $\mathbf{M}_{\Phi\Phi}^{(3)}$ und $\mathbf{M}_{\Phi\Phi}^{(4)}$ ändert sich auf Grund des Aspektwinkels die polarimetrische Signatur des Objekts, wodurch zwei verschiedene Mechanismen detektiert werden. . . . .	70
4.9. Kopolares Bildgebungsresultat nach Wichtung der Zeitbereichsdaten: $\mathbf{I}_{\Phi\Phi}^{(1)}$ zeigt den Bildbereich nach Detektion des polarimetrischen Mechanismus für ungeradzahlige Reflexionen in den Zeitbereichsdaten. $\mathbf{I}_{\Phi\Phi}^{(2)}$ zeigt den Bildbereich für den polarimetrischen Mechanismus geradzahlgiger Reflexionen. . . . .	71
4.10. Kopolares Bildgebungsresultat nach Wichtung der Zeitbereichsdaten: $\mathbf{I}_{\Phi\Phi}^{(3)}$ zeigt den Bildbereich nach Detektion des Dipolmechanismus. Aufgrund des Aspektwinkels ändert sich die polarimetrische Signatur des Objekts, wobei nur der untere bzw. obere Bewegungspfad zur einer Detektion führt (s. Abbildung 4.8). . . . .	72
4.11. Iterative Zeit- und Bildbereichszerlegung: Mit jeder Iteration werden dominante Rückstreukomponenten im Bildbereich detektiert und die zugrundeliegenden Entfernungszellen der Radar-Daten ausgewählt. Nach Transformation dieser Daten in den Merkmalsraum, kategorisiert ein Clustering-Verfahren den Streumechanismus der Entfernungszelle und zieht diese von den Radar-Daten ab. Im Zeitbereich trennbare Mechanismen werden damit in den Radar-Daten separiert und eine Überlagerung verschiedener Mechanismen im Bildbereich verhindert. . . . .	75

4.12. Schematischer Ablauf der Zeit- (grün) und Bildbereichsverarbeitung (blau) [Teil 1] - Nach der Lokalisierung der höchsten Intensität im Bildbereich, dienen die zugehörigen Entfernungszellen der Merkmalsextraktion im Zeitbereich. . . . .	77
4.13. Schematischer Ablauf der Zeit- (grün) und Bildbereichsverarbeitung (blau) [Teil 2] - Mittels Clustering der Merkmalsdaten werden die Entfernungszellen mit hoher Ähnlichkeit selektiert und von den Radar-Daten subtrahiert. . . . .	78
4.14. Nach deren Ähnlichkeit zusammengefasste Gruppen von Clustern der Radar-Daten: Cluster (0) kennzeichnet nicht klassifizierte oder aufgrund geringer Clustergröße aussortierte Entfernungszellen. Alle sonstigen Entfernungszellen wurden nach der Ähnlichkeit des Streumechanismus im Merkmalsraum zu 6 Gruppen zusammengefasst: (1) - geradzahlige Reflexion, (2) - ungeradzahlige Reflexion, (3)-(6) Dipolmechanismus in verschiedenen Projektionen. . . . .	81
4.15. Blockdiagramm bildgebender Signalverarbeitung mit Clusterbasierter Datenselektion: Die Wichtungsfunktion $w$ ist abhängig von der Zugehörigkeit einer Entfernungszelle zu einem bestimmten Cluster. . . . .	82
4.16. Kopolares Bildgebungsresultat nach Gruppierung ähnlicher Cluster: $I_{\Theta\Theta}^{(1)}$ zeigt den Bildbereich der Cluster-Gruppe geradzahliger Reflexionen, $I_{\Theta\Theta}^{(2)}$ entsprechend die ungeradzahligen Reflexionen. Die Nummerierung entspricht der Kennzeichnung der Cluster aus Abbildung 4.14. . . . .	84
4.17. Kopolares Bildgebungsresultat für die verschiedenen Projektionen des Dipol-Mechanismus. $I_{\Theta\Theta}^{(3)}$ und $I_{\Theta\Theta}^{(5)}$ korrespondieren mit der in Abbildung 4.10 gezeigten Projektion auf die Messpositionen oberhalb und unterhalb des Ziels. Die nochmals schwächere Projektion des Stabes als vertikales Objekt in der Sende-Empfangsebene kann durch das iterative Clustering-Verfahren in $I_{\Theta\Theta}^{(4)}$ und $I_{\Theta\Theta}^{(6)}$ abgebildet werden. . . . .	85
5.1. Grundriss der Messumgebung: In quasi-monostatischer Anordnung wurden zwei Hornantennen mithilfe eines Linearpositioniers an zwei Objekten vorbei bewegt (45° gedrehter Stab, Doppelreflektor). Die Darstellungen A und B zeigen Auschnitte aus den gemessenen Impulsantworten an den im Grundriss gekennzeichneten Positionen, wobei die Rückstreuung der Objekte umrahmt hervorgehoben ist. . .	90

5.2. Gemessene Radar-Daten des in Abbildung 5.1 dargestellten Szenarios in lexikographischer Darstellung: Die nach Kompensation der Systemeinflüsse und Abziehen des statischen Hintergrunds ermittelten Radar-Daten beinhalten neben der Rückstreuung der eigentlichen Zielobjekte (eingerahmt) ebenfalls zahlreiche Signalkomponenten der Umgebung. . . . .	94
5.3. Lexikographisches Bildgebungsresultat: Mithilfe der Kirchhoff Migration wurden die Zeitbereichsdaten aus Abbildung 5.2 in den Bildbereich transformiert. . . . .	95
5.4. Gewichtungsmatrizen der Radar-Daten: $\mathbf{B}^{(1)}$ - Doppelreflektor, $\mathbf{B}^{(2)}$ - Stab, $\mathbf{B}^{(3)}$ - linke Kante, $\mathbf{B}^{(4)}$ - rechte Kante . . . . .	98
5.5. Bildgebung nach Zeitbereichszelegung: Mithilfe der in Abbildung 5.4 dargestellten Ergebnisse wurden die Radar-Daten gewichtet und anschließend in den Bildbereich transformiert. Dargestellt sind ausgewählte ko- oder kreuzpolare Bildbereiche, welche sich auf die vier zu identifizierenden Mechanismen beziehen. Die genauen lexikographischen Resultate können Abbildung B.5 bis Abbildung B.8 entnommen werden. . . . .	99
5.6. Klassifizierte Radar-Daten als Gruppen zusammengefasster Clustering-Ergebnisse. Insgesamt wurden 6 Cluster in 3 Gruppen unterschieden. Es besteht eine hohe Ähnlichkeit zwischen der Rückstreuung der vertikalen Kanten (2-grün), der mehrfachen Doppelreflexionen (1-blau) und der Rückstreuung des gedrehten Stabs (3-rot). . . . .	101
5.7. Bildgebung nach Verbundzerlegung: Die Radar-Daten wurden nach der Zugehörigkeit der in Abbildung 5.6 blau dargestellten Cluster-Gruppe 1 selektiert. . . . .	102
5.8. Bildgebung nach Verbundzerlegung: Die Radar-Daten wurden nach der Zugehörigkeit der in Abbildung 5.6 grün dargestellten Cluster-Gruppe 2 selektiert. . . . .	103
5.9. Bildgebung nach Verbundzerlegung: Die Radar-Daten wurden nach der Zugehörigkeit der in Abbildung 5.6 rot dargestellten Cluster-Gruppe 3 selektiert. . . . .	104
5.10. Analyse der Resultate der Verbundzerlegung: Die Entfernungszellen der Cluster wurden genutzt, um für jeden Cluster einen mittleren Parameter für Magnitude, Art und Orientierung des dominanten Mechanismus zu berechnen. . . . .	107

5.11. Informationsgewinnung aus den Resultaten der Verbundzerlegung: Mithilfe der Entropie-Alpha-Zerlegung wurden verschiedene Stichproben der mittleren statistischen Parameter für Art und Zufälligkeit des Mechanismus berechnet. Als Referenz sind die Parameter für die Gesamtheit der Messdaten in grau hinterlegt. . . . .	109
A.1. Polarisationsellipse: $A$ - Amplitude, $\alpha$ - Orientierung, $\beta$ - Elliptizität .	124
B.1. Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche ungeradzahlgiger Reflexionen.	127
B.2. Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche geradzahlgiger Reflexionen. .	128
B.3. Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von $45^\circ$ . . . . .	129
B.4. Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von $-45^\circ$ . . . . .	130
B.5. Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche der Rückstreuung des Doppelreflektors. . . . .	131
B.6. Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche der Rückstreuung des $45^\circ$ gedrehten Stabs. . . . .	132
B.7. Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche der Rückstreuung der linken Kante des Doppelreflektors. . . . .	133
B.8. Bildgebung nach Zeitbereichszerlegung: Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche der Rückstreuung der rechten Kante des Doppelreflektors. . . . .	134
B.9. Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 1 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche geradzahlgiger Reflexionen. . . . .	135
B.10. Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 2 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche ungeradzahlgiger Reflexionen. . . . .	136
B.11. Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 3 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von $45^\circ$ . . . . .	137

B.12. Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 4 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von $90^\circ$ . . . . .	138
B.13. Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 5 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von $-45^\circ$ . . . . .	139
B.14. Bildgebung nach Verbundzerlegung: Cluster 6 - Dargestellt ist die lexikographische Anordnung der Bildbereiche des Dipolmechanismus mit einem Orientierungswinkel von $90^\circ$ . . . . .	140





# Tabellenverzeichnis

2.1. Ausgewählte Polarisationszustände [24] . . . . .	11
2.2. Huynen-Euler-Parameter kanonischer Objekte . . . . .	21
4.1. Parameter der Simulation . . . . .	57
4.2. Räumliche und zeitliche normierte Streumatrizen im Vergleich: Die angegebenen Verzögerungszeiten, Messpositionen und X-Y- Positionen beziehen sich auf exemplarische Teile der Zeit- und Bild- bereichsdaten in Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 . . . . .	60
4.3. Normierte Streumatrizen im Vergleich: Die angegebenen Verzö- gerungszeiten, Messpositionen und X-Y-Positionen beziehen sich auf exemplarische Teile der Zeit- und Bildbereichsdaten in Abbildung 4.2 und Abbildung B.1 bis Abbildung B.4. . . . .	73
4.4. Normierte Streumatrizen im Vergleich: Die angegebenen Verzö- gerungszeiten, Messpositionen und X-Y-Positionen beziehen sich auf exemplarische Teile der Zeit- und Bildbereichsdaten in Abbildung 4.2 und Abbildung B.9 bis Abbildung B.14. . . . .	87
5.1. Überblick der Randbedingungen der Messung . . . . .	92
5.2. Normierte Streumatrizen im Vergleich: Die angegebenen Verzö- gerungszeiten, Messpositionen und X-Y-Positionen beziehen sich auf exemplarische Teile der Zeit- und Bildbereichsdaten in Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3. . . . .	96
5.3. Normierte Streumatrizen im Vergleich: Die angegebenen Verzö- gerungszeiten, Messpositionen und X-Y-Positionen beziehen sich auf exemplarische Teile der Zeit- und Bildbereichsdaten in Abbildung 5.2 und Abbildung 5.5. . . . .	100
5.4. Normierte Streumatrizen im Vergleich: Die Angaben im Zeitbe- reich beziehen sich auf Abbildung 5.2. Aus Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.9 wurden die Vergleichswerte des Bildbereichs entnom- men. . . . .	105



# Literaturverzeichnis

- [1] R. Thomä, "Polarimetrisches Ultrabreitbandradar zur Rückstreuanalyse und Abbildung von Objekten (Ultra Wideband Radar for Environmental Polarimetric Observation and Scattering Analysis - ULTRA EPOS)." <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/255934852>, 2015-2018. Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projektnummer 255934852.
- [2] G. G. Stokes, "On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources," *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 9, p. 399, 1852.
- [3] R. C. Jones, "A new calculus for the treatment of optical systems," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 31, no. 7, pp. 488–493, 1941.
- [4] H. Müller, "Memorandum on the polarization optics of the photo-elastic shutter," *Report Number 2 of the OSRD Project*, vol. 1, no. 2, 1943.
- [5] G. Lehner, *Elektromagnetische Feldtheorie: Für Ingenieure und Physiker*. Berlin and New York: Springer, 7. bearbeitete auflage ed., 2010.
- [6] P. Leuchtman, *Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie*. Et - Elektrotechnik, München [u.a.]: Pearson Studium, bafög-ausg., [repr. der ausg. 2005] ed., 2007.
- [7] G. Sinclair, "The transmission and reception of elliptically polarized waves," *Proceedings of the IRE*, vol. 38, no. 2, pp. 148–151, 1950.
- [8] G. A. Deschamps, "Techniques for handling elliptically polarized waves with special reference to antennas: Part ii - geometrical representation of the polarization of a plane electromagnetic wave," *Proceedings of the IRE*, vol. 39, no. 5, pp. 540–544, 1951.
- [9] E. M. Kennaugh, *Polarization properties of radar reflections*. Columbus: Ohio State University, Masterarbeit, 1952.
- [10] C.D. Graves, "Radar polarization scattering matrix," *Proceedings of the IRE*, vol. 44, no. 2, pp. 248–252, 1956.

- [11] J. R. Huynen, "Measurement of the target scattering matrix," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, pp. 936–946, August 1965.
- [12] J. R. Huynen, *Phenomenological theory of radar targets*. Rotterdam: Drukkerij Bronder-Offset N.V., 1 ed., 1970.
- [13] W. M. Boerner, M. El Arini, Y. C. Chung, and P. Mastoris, "Polarization dependence in electromagnetic inverse problems," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 2, pp. 262–271, 1981.
- [14] M. Davidovitz and W. M. Boerner, "Extension of kennaugh's optimal polarization null theory of the monostatic reciprocal scattering matrix to the bistatic non-symmetrical and/or non-reciprocal monostatic scattering matrix cases," in *1983 Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 21, pp. 484–487, 1983.
- [15] B. Y. Foo, S. Chaudhuri, and W. M. Boerner, "Polarization correction to kennaugh's target impulse response formulation and its application to the interpretation of huynen's mueller matrix parameters in radar polarimetry," in *1984 Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 22, pp. 31–34, 1984.
- [16] B. Y. Foo and W. Boerner, "Interpretation of kennaugh's physical optics impulse response approach for the slightly bistatic case," in *1986 Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 24, pp. 37–40, 1986.
- [17] A. P. Agrawal and W. M. Boerner, "Redevelopment of kennaugh's target characteristic polarization state theory using the polarization transformation radiation formalism for the coherent case," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 27, no. 1, pp. 2–14, 1989.
- [18] B. Y. Foo, S. K. Chaudhuri, and W. M. Boerner, "Polarization correction and extension of the kennaugh-cosgriff target-ramp response equation to the bistatic case and applications to electromagnetic inverse scattering," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, no. 7, pp. 964–972, 1990.
- [19] W. M. Boerner, W. L. Yan, A. Q. Xi, and Y. Yamaguchi, "On the basic principles of radar polarimetry: The target characteristic polarization state theory of kennaugh, huynen's polarization fork concept, and its extension to the partially polarized case," *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 10, pp. 1538–1550, 1991.
- [20] J. R. Huynen, "Physical reality of radar targets," in *SPIE San Diego 1992, Radar Polarimetry*, vol. 1748, pp. 86–96, 1992.

- [21] E. Pottier, “Dr. j. r. huynen’s main contributions in the development of polarimetric radar techniques and how the ‘radar targets phenomenological concept’ becomes a theory,” in *SPIE San Diego 1992, Radar Polarimetry*, vol. 1748, pp. 72–85, 1992.
- [22] F. T. Ulaby and C. Elachi, eds., *Radar polarimetry for geoscience applications*. The Artech House remote sensing library, Norwood, MA: Artech House, 1990.
- [23] H. Mott, *Antennas for radar and communications: A polarimetric approach*. Wiley series in microwave and optical engineering, New York: John Wiley and Sons, 1992.
- [24] J.-S. Lee and E. Pottier, *Polarimetric radar imaging: From basics to applications*, vol. 142 of *Optical science and engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [25] J. van Zyl and Y.-j. Kim, *Synthetic aperture radar polarimetry*, vol. 2 of *JPL space science and technology series*. Hoboken, N.J: John Wiley and Sons, 1st ed ed., 2011.
- [26] W.-M. Boerner and H. Überall, *Radar Target Imaging*, vol. 13 of *Springer Series on Wave Phenomena*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1994.
- [27] S. R. Cloude, “Special unitary groups in polarimetry theory,” in *Proceedings of The International Society for Optics and Photonics - SPIE*, vol. 2265, pp. 2265 – 2265 – 12, 1994.
- [28] W. L. Cameron and L. K. Leung, “Feature motivated polarization scattering matrix decomposition,” in *Radar Conference, 1990., Record of the IEEE 1990 International*, pp. 549–557, 1990.
- [29] W. L. Cameron, N. N. Youssef, and L. K. Leung, “Simulated polarimetric signatures of primitive geometrical shapes,” *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 34, no. 3, pp. 793–803, 1996.
- [30] A. Beutelspacher, *Lineare Algebra: Eine Einführung in die Wissenschaft der Vektoren, Abbildungen und Matrizen*. Springer Spektrum, Wiesbaden: Springer, 8., aktualis. Aufl. ed., 2014.
- [31] R. A. Horn and C. R. Johnson, *Matrix analysis, second edition*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2nd ed. ed., 2013.
- [32] C. Titin Schnaider, “Characterization and recognition of bistatic polarimetric mechanisms,” *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 3, pp. 1755–1774, 2013.

- [33] N. Trouve, E. C. Koeniguer, P. Fargette, and A. de Martino, "Influence of geometrical configurations and polarization basis definitions on the analysis of bistatic polarimetric measurements," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 6, pp. 2238–2250, 2011.
- [34] T. Dallmann, *Polarimetric Radar Cross Section Imaging*. Dissertation, RWTH Aachen: Verlag Dr. Hut, München, 1 ed., 2017.
- [35] S. Cloude and E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 34, no. 2, pp. 498–518, 1996.
- [36] W. M. Boerner, "Recent advances in radar polarimetry and polarimetric sar interferometry," *Radar Polarimetry and Interferometry, Neuilly-sur-Seine, France: RTO*, vol. 1, no. 12, pp. 1–31, 2007.
- [37] R. Touzi, "Target scattering decomposition in terms of roll-invariant target parameters," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 1, pp. 73–84, 2007.
- [38] R. Paladini, L. Ferro Famil, E. Pottier, M. Martorella, F. Berizzi, and E. Dalle Mese, "Point target classification via fast lossless and sufficient  $\omega-\psi-\theta$  invariant decomposition of high-resolution and fully polarimetric sar/isar data," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 3, pp. 798–830, 2013.
- [39] E. Krogager, "New decomposition of the radar target scattering matrix," *Electronics Letters*, vol. 26, no. 18, pp. 1525–1527, 1990.
- [40] L. Carrea and G. Wanielik, "Polarimetric sar processing using the polar decomposition of the scattering matrix," in *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No.01CH37217)*, vol. 1, pp. 363–365 vol.1, 2001.
- [41] W. A. Holm and R. M. Barnes, "On radar polarization mixed target state decomposition techniques," in *Proceedings of the 1988 IEEE National Radar Conference*, pp. 249–254, 1988.
- [42] T. Dallmann and D. Heberling, "Discrimination of scattering mechanisms via polarimetric rcs imaging," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 56, no. 3, pp. 154–165, 2014.
- [43] A. Freeman, S. Durden, and R. Zimmerman, "Mapping sub-tropical vegetation using multi-frequency, multi-polarization sar data," in *Geoscience and*

- Remote Sensing Symposium, 1992. IGARSS '92. International*, vol. 2, pp. 1686–1689, May 1992.
- [44] A. Freeman and S. L. Durden, “Three-component scattering model to describe polarimetric sar data,” *Proc.SPIE*, vol. 1748, pp. 1748 – 1748 – 12, 1993.
- [45] A. Freeman and S. L. Durden, “A three-component scattering model for polarimetric sar data,” *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 36, no. 3, pp. 963–973, 1998.
- [46] J. van Zyl, “The effect of topography on radar scattering from vegetated areas,” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1992. IGARSS '92. International*, vol. 2, pp. 1132–1134, May 1992.
- [47] P. C. Dubois, J. van Zyl, and T. Engman, “Measuring soil moisture with imaging radars,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, pp. 915–926, Jul 1995.
- [48] J. van Zyl, “Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 27, pp. 36–45, Jan 1989.
- [49] J. van Zyl and H. A. Zebker, *Imaging Radar Polarimetry*. Report, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1989.
- [50] J. van Zyl, *On the Importance of Polarization in Radar Scattering Problems*. Dissertation, California Institute of Technology, 1985.
- [51] Y. Yamaguchi, T. Moriyama, M. Ishido, and H. Yamada, “Four-component scattering model for polarimetric sar image decomposition,” *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 43, no. 8, pp. 1699–1706, 2005.
- [52] S. R. Cloude, “Target decomposition theorems in radar scattering,” *Electronics Letters*, vol. 21, pp. 22–24, January 1985.
- [53] S. R. Cloude, “An entropy based classification scheme for polarimetric sar data,” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS '95. 'Quantitative Remote Sensing for Science and Applications', International*, vol. 3, pp. 2000–2002 vol.3, Jul 1995.
- [54] E. Pottier and S. Cloude, “Unsupervised classification of full polarimetric sar data and feature vectors identification using radar target decomposition theorems and entropy analysis,” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS '95. 'Quantitative Remote Sensing for Science and Applications', International*, vol. 3, pp. 2247–2249, 1995.

- [55] S. R. Cloude and E. Pottier, "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric sar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, pp. 68–78, Jan 1997.
- [56] C. A. Wiley, "Pulsed doppler radar methods and apparatus," Patentnr.: US000003196436A, Goodyear Aerospace Corporation, 1965.
- [57] I. G. Cumming and F. H.-c. Wong, *Digital processing of synthetic aperture radar data: Algorithms and implementation*. Artech House remote sensing library, Boston, Mass: Artech House, 2005.
- [58] B.-C. Wang, *Digital processing techniques and applications in radar image processing*. Information and Communication Technology Series, Boston, Mass: John Wiley and Sons, 2008.
- [59] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), "Terrasar-x: Systemauslegung." [www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10381/569\\_read-432/](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10381/569_read-432/), 2012. Aufgerufen: 2018-05-14.
- [60] Airbus Defence and Space, "Terrasar-x image products." [www.intelligence-airbusds.com/en/5646-terrasar-x-image-products](http://www.intelligence-airbusds.com/en/5646-terrasar-x-image-products), 2018. Aufgerufen: 2018-05-14.
- [61] J. G. Hagedoorn, *A process of seismic reflection interpretation*. Leiden: Brill, 1954.
- [62] J. F. Claerbout, "Coarse grid calculations of waves in inhomogeneous media with application to delineation of complicated seismic structure," *Geophysics*, vol. 35, no. 3, pp. 407–418, 1970.
- [63] J. F. Claerbout and S. M. Doherty, "Downward continuation of moveout-corrected seismograms," *Geophysics*, vol. 37, no. 5, 1972.
- [64] R. H. Stolt, "Migration by fourier transform," *Geophysics*, vol. 02, no. 1, pp. 23–48, 1978.
- [65] J. Gazdag, *Wave equation migration with the phase shift method*, vol. 3361 of *Technical report / IBM Palo Alto Scientific Center*. Palo Alto, Calif.: IBM, 1978.
- [66] W. A. Schneider, *Integral formulation for migration in two and three dimensions*, vol. 43, no. 1 of *Geophysics*. Tulsa, Okla.: Society of Exploration Geophysicists, 1978.



- [67] "Process and apparatus for detecting foreign objects in the ground," Patentnr.: GB000000917557A, ELTRO Gesellschaft für Strahlungstechnik mbH, Heidelberg, 1959.
- [68] R. Lerner, "Ground radar system," Patentnr.: US000003831173A, Massachusetts Institute of Technology, 1969.
- [69] R. Morey, "Geophysical surveying system employing electromagnetic impulses," Patentnr.: US000003806795A, Geophysical Survey Systems Inc, 1972.
- [70] M.-G. Di Benedetto, T. Kaiser, A. F. Molisch, I. Oppermann, C. Politano, and D. Porcino, *UWB Communication Systems: A Comprehensive Overview*. EURASIP Book Series on Signal Processing and Communications, Cairo: Hindawi Publishing Corporation, 2006.
- [71] L. P. Peters, J. J. Daniels, and J. D. Young, "Ground penetrating radar as a subsurface environmental sensing tool," *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, pp. 1802–1822, Dec 1994.
- [72] S. Vitebskiy, L. Carin, M. A. Ressler, and F. Le H, "Ultra-wideband, short-pulse ground-penetrating radar: Simulation and measurement," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no. 3, pp. 762–772, 1997.
- [73] B. Scheers, M. Piette, and A. V. Vorst, "The detection of ap mines using uwb gpr," in *1998 Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines (IEE Conf. Publ. No. 458)*, pp. 50–54, 1998.
- [74] U. Uschkerat, "Comparing uwb gpr measurements and simulation of simple shaped buried targets," in *1998 Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines (IEE Conf. Publ. No. 458)*, pp. 41–44, 1998.
- [75] L. Carin, R. Kapoor, and C. E. Baum, "Polarimetric sar imaging of buried landmines," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 6, pp. 1985–1988, 1998.
- [76] J. Homer, H. T. Tang, and I. D. Longstaff, "Radar imaging of shallow buried objects," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International*, vol. 5, pp. 2477–2479, 1999.
- [77] A. G. Yarovoy, B. Sai, G. Hermans, P. van Genderen, L. P. Ligthart, A. D. Schukin, and I. V. Kaploun, "Ground penetrating impulse radar for detection of small and shallow-buried objects," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International*, vol. 5, pp. 2468–2470, 1999.

- [78] W. Lertniphonphun and J. McClellan, "Migration of underground targets in uwb-sar systems," *2000. Proceedings. 2000 International Conference on Image Processing*, vol. 1, pp. 713–716, 2000.
- [79] J. A. Ratcliffe, J. Sachs, S. Cloude, G. N. Crisp, H. Sahli, P. Peyerl, and G. D. Pasquale, "Cost effective surface penetrating radar device for humanitarian demining," in *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 5*, pp. 275–283, Springer, Boston, MA, 2002.
- [80] Federal Communications Commission (FCC), "Technical requirements for indoor uwb systems," in *Code of Federal Regulations, National Archives and Records Administration*, no. 47, p. 15517, Oktober 2002.
- [81] R. Thomä, *Ultra-wideband radio technologies for communications, localization and sensor applications*. Rijeka: Intechopen.Com, 2013.
- [82] X. Zhuge, A. Yarovoy, T. Savelyev, and L. Ligthart, "Modified kirchhoff migration for uwb mimo array-based radar imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 6, pp. 2692–2703, 2010.
- [83] X. Zhuge, T. Savelyev, A. Yarovoy, L. Ligthart, and B. Levitas, "Comparison of different migration techniques for uwb short-range imaging," *2009. EuRAD 2009. European Radar Conference*, pp. 184–187, 2009.
- [84] X. Zhuge, *Short-range ultra-wideband imaging with multiple-input multiple-output arrays*. Delft University of Technology, Netherlands: Dissertation, 2010.
- [85] J. Sachs, *Handbook of Ultra-Wideband Short-Range Sensing: Basics, Principles and Applications of Ultra Wideband Sensors*. Weinheim: John Wiley and Sons, 2013.
- [86] H. Zhou, M. Sato, and H. Liu, "Migration velocity analysis and prestack migration of common-transmitter gpr data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 1, pp. 86–91, 2005.
- [87] M. Sato and X. Feng, "Gpr migration algorithm for landmines buried in inhomogeneous soil," in *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1B, pp. 206–209, 2005.
- [88] V. Kabourek and P. Cerny, "Sar and stolt migration processing for plastic landmine detection," in *20th International Conference Radioelektronika 2010*, pp. 1–4, 2010.

- [89] D. Garcia, L. Le Tarnec, S. Muth, E. Montagnon, J. PorÅ©e, and G. Cloutier, "Stolt's f-k migration for plane wave ultrasound imaging," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 60, no. 9, pp. 1853–1867, 2013.
- [90] F. Senglee and S. Kashyap, "Cross-correlated back projection for uwb radar imaging," *2004. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 2, pp. 1275–1278, 2004.
- [91] R. Zetik, J. Sachs, and R. Thomä, "Modified cross-correlation back projection for uwb imaging: numerical examples," *2005. ICU 2005. 2005 IEEE International Conference on Ultra Wideband*, p. 5 pp, 2005.
- [92] R. Zetik, *UWB sensors for surveillance applications in emergency and security situations*. Habilitation, Technische Universität Ilmenau, ResearchGate, 2014.
- [93] T. Sakamoto and T. Sato, "A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform," *IEICE TRANS. COMMUN*, vol. Vol. E87-B, no. 5, pp. 1357–1365, 2004.
- [94] T. Sakamoto and T. Sato, "A fast algorithm of 3-dimensional imaging for pulse radar systems," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE*, vol. 2, pp. 2099–2102, 2004.
- [95] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, "A high-resolution imaging algorithm without derivatives based on waveform estimation for uwb pulse radars," *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 1481–1484, 2007.
- [96] M. Helbig, M. Hein, U. Schwarz, and J. Sachs, "Preliminary investigations of chest surface identification algorithms for breast cancer detection," in *Ultra-Wideband, 2008. ICUWB 2008. IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 195–198, 2008.
- [97] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, "Accurate uwb radar three-dimensional imaging algorithm for a complex boundary without range point connections," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 4, pp. 1993–2004, 2010.
- [98] Y. Sasaki, F. Shang, S. Kidera, T. Kirimoto, K. Saho, and T. Sato, "Three-dimensional imaging method incorporating range points migration and doppler velocity estimation for uwb millimeter-wave radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 122–126, 2017.

- [99] A. Yamaryo, T. Takatori, S. Kidera, and T. Kirimoto, "Range-point migration-based image expansion method exploiting fully polarimetric data for uwb short-range radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 2170–2182, April 2018.
- [100] T. Dallmann and D. Heberling, "A reference target for polarimetric radar cross-section measurements," in *Antennas and Propagation (EuCAP), 2014 8th European Conference on*, pp. 2313–2317, 2014.
- [101] S. S. Ahmed, A. Schiessl, F. Gumbmann, M. Tiebout, S. Methfessel, and L. P. Schmidt, "Advanced microwave imaging," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 13, pp. 26–43, Sept 2012.
- [102] T. Sakamoto, T. Savelyev, P. Aubry, and A. Yarovoy, "Fast range point migration method for weapon detection using ultra-wideband radar," in *Radar Conference (EuRAD), 2012 9th European*, pp. 230–233, 2012.
- [103] R. Salman, I. Willms, T. Sakamoto, T. Sato, and A. Yarovoy, "3d imaging of a manmade target with weak scattering centres by means of uwb-radar," in *Ultra-Wideband (ICUWB), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 109–112, 2013.
- [104] R. Salman and I. Willms, "Scattering matrix decomposition of quad-polarized short-range ultrawideband radar data," in *Radar Symposium (IRS), 2013 14th International*, vol. 2, pp. 661–666, 2013.
- [105] J. Adametz and L. P. Schmidt, "Threat object classification with a close range polarimetric imaging system by means of h-alpha decomposition," in *Radar Conference (EuRAD), 2013 European*, pp. 77–80, 2013.
- [106] A. Ariza, R. Müller, R. Stephan, F. Wollenschläger, A. Schulz, M. Elkhoully, C. Scheytt, U. Trautwein, J. Müller, R. Thomä, and M. Hein, "60 ghz polarimetric mimo sensing: Architectures and technology," in *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on*, pp. 2578–2582, 2012.
- [107] A. Ariza and R. Thomä, "Polarimetric ultrawideband mimo radar for security check points: Detecting and classifying suspects carrying wires," in *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on*, pp. 1733–1736, 2012.
- [108] R. Thomä, O. Hirsch, J. Sachs, and R. Zetik, "Uwb sensor networks for position location and imaging of objects and environments," *2007. EuCAP 2007. The Second European Conference on Antennas and Propagation*, pp. 1–9, 2007.

- [109] R. Thomä, O. Hirsch, J. Sachs, and R. Zetik, "Uwb sensor networks for position location and imaging of objects and environments," in *Short-Range Wireless Communications: Emerging Technologies and Applications*, Editors: R. Kraemer, M. D. Katz, pp. 97–112, John Wiley and Sons, Ltd, 2009.
- [110] O. Hirsch, R. Zetik, and R. Thomä, "Imaging in uwb sensor networks," in *Wireless Sensor Networks* (Y. K. Tan, ed.), ch. 24, Rijeka: InTech, 2010.
- [111] M. Moallem and K. Sarabandi, "Polarimetric study of mmw imaging radars for indoor navigation and mapping," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 1, pp. 500–504, 2014.
- [112] R. Salman, I. Willms, L. Reichardt, T. Zwick, and W. Wiesbeck, "On polarization diversity gain in short range uwb-radar object imaging," in *Ultra-Wideband (ICUWB), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 402–406, 2012.
- [113] T. Deißler and J. Thielecke, "Feature based indoor mapping using a bat-type uwb radar," *2009 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, pp. 475–479, Sept 2009.
- [114] T. Deißler, J. Thielecke, R. Salman, T. Schultze, and I. Willms, "Uwb radar object recognition for slam," *11-th International Radar Symposium*, pp. 1–4, June 2010.
- [115] T. Deißler, M. Janson, R. Zetik, and J. Thielecke, "Infrastructureless indoor mapping using a mobile antenna array," *2012 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, pp. 36–39, April 2012.
- [116] J. Seitz, M. Schaub, O. Hirsch, R. Zetik, T. Deißler, R. Thoma, and J. Thielecke, "Uwb feature localization for imaging," *2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, vol. 2, pp. 199–202, Sept 2008.
- [117] **M. Röding**, R. Zetik, and R. S. Thomä, "Polarimetric target discrimination for ultrawideband radar imaging," in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, May 2015.
- [118] **M. Röding** and R. S. Thomä, "Polarimetric covariance matrix processing for target discrimination in time domain," in *2015 16th International Radar Symposium (IRS)*, pp. 888–893, June 2015.
- [119] **M. Röding**, T. Dallmann, R. S. Thomä, and D. Heberling, "Bistatic imaging of linear structures for polarimetric ultrawideband radar," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, April 2016.

- [120] **M. Röding** and R. S. Thomä, “Exploiting polarimetric radar cross section characteristics for clustering of ultrawideband radar signals,” in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, April 2016.
- [121] **M. Röding**, G. Sommerkorn, S. Häfner, R. Müller, and R. S. Thomä, “Fully polarimetric wideband rcs measurements for small drones,” in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, April 2017.
- [122] **M. Röding**, G. Sommerkorn, S. Häfner, A. Ihlow, S. Jovanoska, and R. S. Thomä, “A double arch positioner for bistatic rcs measurements with four degrees of freedom,” in *2017 14th European Radar Conference (EuRAD)*, pp. 161–165, Oktober 2017.
- [123] A.J. Poelman, “Virtual polarisation adaption: A method of increasing the detection capability of a radar system through polarisation-vector processing,” *Proceedings of the IEE*, vol. 128, no. 5, pp. 261–270, 1981.
- [124] A. Kostinski and W. M. Boerner, “On the polarimetric contrast optimization,” *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 35, no. 8, pp. 988–991, 1987.
- [125] A. J. Poelman and J. Guy, “Multinotch logic-product polarisation suppression filters: A typical design example and its performance in a rain clutter environment,” *IEE Proceedings for Communications, Radar and Signal Processing*, vol. 131, no. 4, p. 383, 1984.
- [126] M. Gherardelli, D. Giuli, and M. Fossi, “Suboptimum adaptive polarisation cancellers for dual-polarisation radars,” *IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing*, vol. 135, no. 1, p. 60, 1988.
- [127] A. Kostinski, B. D. James, and W. M. Boerner, “On the optimal reception of partially polarized waves,” *Proceedings of the Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 545–548, 1988.
- [128] R. Touzi, S. Coze, T. Le Toan, and A. Lopes, “Optimization of polarimetric discriminators in sar images,” *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1990. IGARSS '90. 'Remote Sensing Science for the Nineties'. , 10th Annual International*, pp. 1683–1686, 1990.
- [129] J. Liu and Z. Zhang, “A new polarization filter based on weighted combination,” *2010 IEEE 10th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, pp. 2168–2171, 2010.

- [130] A. Garcia Ariza, R. Müller, F. Wollenschläger, A. Schulz, M. Elkhoully, Y. Sun, S. Glisic, U. Trautwein, R. Stephan, J. Müller, R. Thomä, and M. Hein, “60 ghz ultrawideband polarimetric mimo sensing for wireless multi-gigabit and radar,” *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 4, pp. 1631–1641, 2013.
- [131] D. Pelleg and A. Moore, “X-means: Extending k-means with efficient estimation of the number of clusters,” in *Proceedings of the 17th International Conference on Machine Learning*, 2000.
- [132] A. Dempster, N. Laird, and D. Rubin, “Maximum likelihood from incomplete data via the em algorithm,” *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. Series B, no. 39, pp. 1–38, 1977.
- [133] C. F. Dormann, *Parametrische Statistik : Verteilungen, maximum likelihood und GLM in R*. Springer Spektrum, Wiesbaden: Springer, 2. auflage ed., 2017.
- [134] M. Rossberg, J. Sachs, P. Rauschenbach, P. Peyerl, K. Pressel, W. Winkler, and D. Knoll, “11 ghz sigc circuits for ultra wideband radar,” 2000. *Proceedings of the 2000 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*, pp. 70–73, 2000.
- [135] J. Sachs, “M-sequence ultra-wideband-radar: state of development and applications,” 2003. *Proceedings of the International Radar Conference*, pp. 224–229, 2003.
- [136] J. Sachs, “M-sequence radar,” in *D.J. Daniels: Ground Penetrating Radar 2nd Edition*, pp. 225 – 237, 2004.
- [137] E. Malz, R. Thomä, R. Zetik, P. Semashko, and A. Ariza, “Polarimetric ultra-wideband radar — principles and applications,” in *Ultra-Wideband (ICUWB), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 407–411, 2012.
- [138] E. Malz, R. Zetik, P. Semashko, R. Thomä, and A. P. Garzia Ariza, “Polarimetric ultrawideband radar,” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, pp. 5919–5922, 2012.
- [139] M. Piccardi, “Background subtraction techniques: a review,” 2004 *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 4, pp. 3099–3104, 2004.
- [140] A. J. Schwab, *Begriffswelt der Feldtheorie : praxisnahe, anschauliche Einführung ; elektromagnetische Felder, Maxwellsche Gleichungen, Gradient, Rotation, Divergenz, Finite Elemente, Finite Differenzen, Ersatzladungsverfahren, Boundary-Element-Methode, Momentenmethode, Monte-Carlo-Verfahren*. Berlin: Springer, 6. bearbeitete auflage ed., 2010.